



Paulo Vítor Albano

**Utilização de ácido tricloroisocianúrico (ATCI) na
desinfecção de efluente sanitário de lagoa facultativa:
Avaliação da formação de Trialometanos (TAMs)**

**Campinas
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

PAULO VÍTOR ALBANO

**UTILIZAÇÃO DE ÁCIDO TRICLOROISOCIANÚRICO
(ATCI) NA DESINFECÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO
DE LAGOA FACULTATIVA: AVALIAÇÃO DA
FORMAÇÃO DE TRIALOMETANOS (TAMs)**

Orientador: Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO PAULO VÍTOR ALBANO E ORIENTADO PELO PROF. DR. BRUNO CORAUCCI FILHO.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da
Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da
Silva - CRB 8/5974

AL 13u Albano, Paulo Vitor, 1975-
Utilização de ácido tricloroisocianúrico (ATCI) na desinfecção de efluente
sanitário de lagoa facultativa: avaliação da formação de trihalometanos (TAMs) /
Paulo Vitor Albano. - Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Bruno Coraucci Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Cloração. 2. Esgotos. 3. Cloro. I. Coraucci Filho, Bruno, 1948-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Use of trichloroisocyanuric acid (ATCI) the disinfection of sanitary
effluent from facultative pond: evaluation forming trihalomethanes (TAMs)

Palavras-chave em inglês:

Chlorination

Sewage

Chlorine

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Bruno Coraucci Filho [Orientador]

Edevar Luvizotto Júnior

Ronaldo Stefanutti

Data de defesa: 28-08-2014

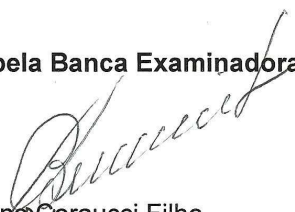
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE ÁCIDO TRICLOROISOCIANÚRICO (ATCI) NA
DESINFECÇÃO DE EFLUENTE SANITÁRIO DE LAGOA
FACULTATIVA: AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE
TRIALOMETANOS (TAMS)**

Paulo Vítor Albano

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Edeval Luvizotto Júnior
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará**

Campinas, 28 de agosto de 2014

Resumo

ALBANO, P. V. **Utilização de ácido tricloroisocianúrico (ATCI) na desinfecção de efluente sanitário de lagoa facultativa: avaliação da formação de trialometanos (TAMs)**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2014. 91p. Dissertação (Mestrado), 2014.

A cloração é a tecnologia mais aplicada dentre os diversos processos utilizados para desinfecção das águas residuárias, devido ao custo reduzido e praticidade de aplicação, quando comparada com as demais técnicas. O inconveniente do uso deste tipo de técnica é a possibilidade de formação de subprodutos de desinfecção, dentro dos quais se destaca os trialometanos (TAMs). O presente trabalho avaliou a formação de TAMs em esgoto tratado de uma lagoa facultativa, submetido a um sistema de desinfecção por meio da utilização de ATCI. Avaliou também a eficiência deste sistema na desinfecção do efluente da lagoa facultativa. A avaliação consistiu de ensaio experimental, realizado em laboratório, para definição da dosagem e do tempo de contato; além do teste em escala real com a implantação do sistema de desinfecção na lagoa facultativa, situada no município de Itirapuã - SP. Os resultados obtidos demonstram que o sistema foi efetivo na desinfecção do efluente com uma aplicação de 10mg/L de cloro residual total e sem formação significativa de TAM, em média abaixo dos 3,0 µg/L, aparentemente devido à presença de concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal (N-NH_3) no efluente, da ordem de 43,0 mg/L. Conclui-se que a utilização do ATCI torna-se interessante devido à segurança, simplicidade das instalações e facilidade operacional.

Palavras-chave: cloração, esgotos, cloro.

Abstract

ALBANO, P. V. Utilização de ácido tricloroisocianúrico (ATCI) na desinfecção de efluente sanitário de lagoa facultativa: avaliação da formação de trihalometanos (TAMs). Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2014. 91p. Dissertação (Mestrado), 201.

Chlorination is the most technology applied among the different processes used for disinfection of wastewater, due to reduced cost and practicality of application compared with other techniques. The disadvantage of using this type of technique is the possibility of formation of disinfection byproducts within which stands trihalomethanes (TAMs). This study evaluated the formation of TAMs in treated sewage from a facultative pond, subjected to a disinfection system using ATCI. Also evaluated the efficiency of this system for the disinfection of effluent from facultative pond. The evaluation consisted of an experimental test performed in the laboratory, to define the dosage and time of contact; beyond the full-scale test with the implementation of the disinfection system in the facultative pond, located in the municipality of Itirapuã - SP. The results demonstrated that the system was effective in disinfection of the effluent with an application of 10 mg / L of total chlorine residual and without significant formation of TAM on average below 3.0 g / L, apparently due to the presence of high concentrations of ammonia nitrogen (NH₃-N) in the effluent of the order of 43.0 mg / L. We conclude that the use of ATCI becomes interesting due to security, simplicity of installation and operational ease.

Key words: chlorination, sewage, chlorine.

SUMÁRIO

Página

1	INTRODUÇÃO	01
2	OBJETIVOS	03
2.1	Objetivo Geral	03
2.2	Objetivos Específicos.....	03
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1.	Desinfecção.....	05
3.2.	História da desinfecção	06
3.3.	Tecnologias de desinfecção	08
3.4.	Cinética da desinfecção	09
3.5.	Interferências do processo de desinfecção.....	12
3.6.	Características desejáveis de um desinfetante	14
3.7.	Evolução dos processos de cloração.....	15
3.8.	Cloro e seus derivados.....	16
3.8.1	Cloro gás.....	19
3.8.2	Hipocloritos.....	20
3.8.3	Dióxido de cloro	21
3.8.4	Cloro combinado	22
3.8.5	Ácido Tricloroisocianúrico	24
3.9.	Formas de aplicação do cloro no esgoto	26
3.10.	Dosagens de cloro requeridas para desinfecção de esgotos	27
3.11.	Toxicidade de residual do cloro	29
3.12.	Remoção de cloro residual.....	30
3.13.	Formação de subprodutos da desinfecção por cloração	31
3.13.1	Definição de Trialometano	35
3.13.2	Trialometano - Histórico.....	35
3.13.3	Reações de Formação dos Trialometanos	36
3.13.4	Níveis permissíveis de trialometanos	38
3.14.	Aspectos relativos à operação e à manutenção de sistemas utilizando cloração como método de desinfecção.....	38
3.15.	Custos para implantação da cloração.....	40
4	Material e método.....	43
4.1.	Desempenho do clorador	44
4.1.1	Descrição e funcionamento do clorador	45
4.1.2	Montagem e avaliação da capacidade de dosagem do clorador.....	47
4.1.3	Cálculo do tamanho da área molhada.....	49
4.1.4	Ensaio realizados durante a avaliação do desempenho do clorador.....	51
4.1.5	Caracterização do desinfetantes.....	51
4.2.	Etapa 2 – Arranjo experimental para determinação da dosagem.....	53
4.2.1	Ensaio de caracterização do efluente	54
4.2.2	Descrição do ensaio experimental – dosagem e tempo de contato	55
4.3.	Implantação do sistema de desinfecção na lagoa de estabilização	59
4.3.1	Descrição da ETE	59
4.3.2	Instalação do clorador.....	62

4.3.3	Avaliação da eficiência do sistema de desinfecção	64
4.3.4	Caracterização do efluente da ETE	63
4.3.5	Avaliação do custo da desinfecção	64
4.3.6	Tratamento estatístico dos resultados	64
5	Resultados e discussão.....	65
5.1.	Etapa 1 - estudo da capacidade de dosagem do clorador	65
5.2.	Etapa 2 - ensaio experimental para estimativa da dosagem de cloro	72
5.3.	Etapa 3 - Implantação do sistema de desinfecção na ETE	74
5.3.1	Avaliação da formação de TAMs.....	74
5.3.2	Caracterização do efluente.....	84
5.3.3	Avaliação do custo da desinfecção utilizando ATCI.....	85
6	CONCLUSÃO	87
7	Recomendações ou sugestões.....	89
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

DEDICATÓRIA

À minha mãe e meu pai, Antônia e Benedito. Por todo o carinho, atenção e por acreditarem no meu potencial. A minha esposa, Adriana e meu filho, Yuri, essenciais em minha vida!

Agradecimentos

A Deus, por tudo;

Ao Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho, pela orientação, dedicação, apoio, paciência e ensinamentos;

Aos companheiros de trabalho da SABESP de Franca, sobretudo a equipe da Divisão de Controle Sanitário e Ambiental (RGOC), a equipe da área de manutenção (RGFF2) e aos funcionários da SABESP de Itirapuã;

Ao amigo Engenheiro Orlando Antunes Cintra Filho, por ter me incentivado, pelo apoio irrestrito e colaboração direta no trabalho;

Ao amigo Biólogo Josimar Augusto Campos, pelo apoio irrestrito e colaboração direta no trabalho;

Aos professores e funcionários da pós-graduação da FEC-Unicamp.

**“A coisa mais bonita que podemos
experimental é o misterioso”**
Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 – Formula estrutural ATCI.....	<u>25</u>
Figura 3.2 - Estrutura molecular dos Trihalometanos mais frequentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público.....	<u>33</u>
Figura 4.1 – Imagem aérea ETE de Itirapuã.....	<u>44</u>
Figura 4.2 – Clorador de pastilhas de ATCI instalado na ETA Franca.....	<u>45</u>
Figura 4.3 - Ilustração do clorador de pastilhas com identificação dos componentes	<u>47</u>
Figura 4.4 - Clorador de pastilhas instalado na ETA Franca.....	<u>48</u>
Figura 4.5 – Imagem da medição da altura da área molhada realizada no sistema de cloração instalado na ETA Franca	<u>51</u>
Figura 4.6 - Pastilhas de ATCI	<u>52</u>
Figura 4.7 - Teste de cloração no efluente da lagoa facultativa da ETE de Itirapuã.....	<u>56</u>
Figura 4.8 - Fluxograma do sistema de tratamento de esgoto – ETE Itirapuã	<u>60</u>
Figura 4.9 - Lagoa anaeróbia da ETE Itirapuã	<u>61</u>
Figura 4.10 - Lagoa facultativa 1 da ETE Itirapuã	<u>61</u>
Figura 4.11 - Lagoa facultativa 2 da ETE Itirapuã	<u>61</u>
Figura 4.12 - Tanque de contato da ETE Itirapuã	<u>61</u>
Figura 4.13 – Clorador instalado na ETE Itirapuã.....	<u>62</u>
Figura 4.14 – Detalhe do fluxo do esgoto no clorador	<u>62</u>
Figura 5.1 – Variação do cloro em função da altura dos furos do tubete e vazão.....	<u>67</u>
Figura 5.2 - Teste do clorador em diferentes alturas de furos no tubete	<u>68</u>
Figura 5.3 - Teste do clorador com tubete perfurado a 5 cm de altura.....	<u>68</u>
Figura 5.4 - Teste do clorador com tubete perfurado a 10 cm de altura.....	<u>69</u>
Figura 5.5 - Teste do clorador com tubete perfurado a 20 cm de altura.....	<u>70</u>
Figura 5.6 - Teste do clorador com tubete perfurado a 30 cm de altura.....	<u>70</u>
Figura 5.7 – Curva da concentração de cloro residual total.	<u>71</u>
Figura 5.8 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente de lagoa facultativa – teste 1.....	<u>75</u>
Figura 5.9 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente de lagoa facultativa – teste 2.....	<u>77</u>
Figura 5.10 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente de lagoa facultativa – teste 3.....	<u>78</u>
Figura 5.11 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente de lagoa facultativa – teste 4.....	<u>79</u>
Figura 5.12 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente de lagoa facultativa – teste 5.....	<u>80</u>

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 - Valores de Kd (K') em função do pH e temperatura.	11
Tabela 3.2 - Propriedades dos desinfetantes	15
Tabela 3.3 - Propriedades físico-químicas do cloro.	17
Tabela 3.4 - Comparação dos processos de desinfecção	18
Tabela 3.5 - Principais propriedades das cloraminas	24
Tabela 3.6 - Características do ácido tricloroisocianúrico	25
Tabela 3.7 - Valores de pH da solução a 1% dos principais produtos clorados.....	26
Tabela 3.8 - Dosagem típica de cloro para desinfecção de esgotos brutos e tratados	29
Tabela 3.9 - Propriedades agentes desclorantes e dosagens	31
Tabela 3.10 - Principais subprodutos decorrentes da cloração da água	32
Tabela 3.11 - Fórmulas dos trihalometanos.....	35
Tabela 3.12 - Concentrações de cloro na fase gasosa e seus efeitos.	39
Tabela 3.13 - Procedimentos de emergência a serem tomados em decorrência de contato com o cloro.	40
Tabela 3.14 - Custos de capital e de operação de diversos sistemas de desinfecção	41
Tabela 3.15 - Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção.....	42
Tabela 4.1 - Teste de capacidade de dosagem do clorador de pastilhas.....	49
Tabela 4.2 - Característica do ácido tricloroisocianúrico	52
Tabela 4.3 - Característica do hipoclorito de sódio	53
Tabela 4.4 - Metodologia utilizada para os ensaios.....	55
Tabela 4.5 - Dosagem de cloro aplicada nas amostras do efluente da lagoa facultativa de Itirapuã	57
Tabela 4.6 - Súmula do teste com hipoclorito de sódio e ácido tricloroisocianúrico	58
Tabela 4.7 - Características das lagoas	60
Tabela 5.1 - Resultados dos testes para estudo da capacidade de dosagem do clorador	66
Tabela 5.2 - Valores da concentração de NaClO e ATCI utilizados na inativação média de coliformes totais e E. coli na pesquisa com efluentes da lagoa facultativa de Itirapuã.....	73
Tabela 5.3 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 1	75
Tabela 5.4 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 2	76
Tabela 5.5 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 3	78
Tabela 5.6 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 4	79
Tabela 5.7 - Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 5	80
Tabela 5.8 - Resultados de caracterização do efluente.....	84
Tabela 5.9 - Custo da desinfecção com ácido tricloroisocianúrico	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional das Águas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ATCI	Ácido tricloroisocianúrico
AWWA	American Water Works Association
CaClO_2	Hipoclorito de cálcio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CF	Coliformes Fecais
CHBr_2Cl	Dibromoclorometano
CHBr_3	Tribromometano ou Bromofórmio
CHBrCl_2	Bromodiclorometano
CHCl_3	Triclorometano ou clorofórmio
Cl	Cloro
ClO_2	Dióxido de cloro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono orgânico total
CRT	Cloro residual total
CT	Coliformes totais
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DPD	N, N-diethyl-p-phenylenediamine
DQO	Demanda química de oxigênio
<i>E.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgotos
H_2S	Sulfeto de Hidrogênio
HAA	Ácidos Haloacéticos
HOCl	Ácido Hipocloroso
LOG	Logaritmo ou Unidade logarítmica
NaClO	Hipoclorito de sódio

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NH ₂ Cl	Monocloramina
NH ₃	Nitrogênio amoniacal
NHCl ₂	Dicloramina
NMP	Número mais provável
O ₃	Ozônio
OCl	Ion hipoclorito
OD	Oxigênio dissolvido
OH ⁻	Hidroxila
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
PPM	Parte por milhão
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
PVC	Policloreto de vinila
r	Coefficiente de Correlação de Pearson
RPM	Rotação por minuto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
TAM	Triometanos
TTAMs	Triometanos Totais
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente
UFC	Unidade Formadora de Colônia
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultravioleta
°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
μg	Micrograma
μL	Microlitro

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados da quarta edição do relatório sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos da ONU (2012), nenhuma região do mundo está livre das pressões sobre recursos hídricos. Na Europa, por exemplo, 120 milhões de cidadãos não têm acesso à água potável. Em certas partes do continente, os cursos de água podem chegar a perder até 80% de seu volume no verão. Já na África – que carrega uma taxa média de aumento da população de 2,6% por ano, enquanto a média mundial é de apenas 1,2% –, a demanda de água acelera a deterioração de seus recursos hídricos. A Ásia e o Pacífico abrigam 60% da população do mundo, mas apenas 36% dos recursos hídricos. De acordo com o relatório, cerca de 480 milhões de pessoas não tinham acesso, em 2008, a uma fonte de água de qualidade, e 1,9 bilhão não tinham infraestrutura sanitária adequada. No Oriente Médio, pelo menos doze países sofrem de escassez completa de água. Já na América Latina, a taxa de extração de água no século XX foi duplicada, devido ao crescimento demográfico e à alta da atividade industrial. O relatório informa que mundialmente cerca de 80% das águas residuais não são recolhidas nem tratadas, mas vão direto a outros corpos d'água ou se infiltram no subsolo, o que acaba causando problemas de saúde na população e a deterioração do meio ambiente. Considerando esta situação, torna-se acentuada a necessidade de tratamento e desinfecção dos efluentes sanitários.

O objetivo principal da desinfecção é sem dúvida a proteção da saúde pública, de acordo com os possíveis usos da água. Os usos principais em que é maior a preocupação com a saúde pública são o abastecimento para consumo público, irrigação ou uso agrícola e recreação. Para cada um destes usos aplicam-se critérios e padrões de qualidade, em que não apenas as incidências e concentrações máximas de organismos são consideradas, mas os próprios organismos, grupos e tipos. A desinfecção não tem como objetivo exterminar completamente a presença de

microrganismos, mas sim a inativação seletiva dos organismos que ameaçam a saúde humana.

Para a obtenção de um efluente tratado com concentração de CF < 10³ NMP/100ml, como recomendado para reuso em irrigação, ou como indicado para corpos d'água de classe 2, só é possível com a prática de um processo complementar de desinfecção, ou por lagoas de maturação em sequência.

A metodologia usualmente adotada para esse caso é a aplicação de agentes químicos como o cloro. Dentre os vários processos disponíveis utilizados para desinfecção dos esgotos, a cloração é uma alternativa bastante interessante devido ao fato de ser uma tecnologia plenamente dominada, possuir amplo emprego no país, além do seu baixo custo operacional.

Alternativas têm sido estudadas depois da descoberta de que subprodutos tóxicos, prejudiciais à saúde humana são formados após a cloração em águas, contendo matérias orgânicas naturais como os ácidos fúlvicos e húmicos. As duas maiores classes de subprodutos oriundos da cloração são os trialometanos ((TAMs) e os ácidos haloacéticos (HAAs), ambos com potencial carcinogênico). Entretanto, vários estudos demonstram que a presença no esgoto do composto nitrogênio amoniacal reduz a formação de subprodutos como o Trialometano (TAM).

Assim sendo, propõe-se pelo presente trabalho, o qual possui o objetivo de estudar os efeitos da desinfecção mediante ácido tricloroisocianúrico de esgoto sanitário previamente tratado em lagoa facultativa, através da determinação da dosagem e do tempo de contato mínimos que levam ao grau de desinfecção necessário requerido pela legislação e avaliação da formação do subproduto Trialometano (TAM). O estudo foi efetuado em planta piloto como uma primeira etapa prévia à implementação de um sistema de desinfecção a escala de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Foi também efetuado um estudo econômico sobre os custos de

implementação e operação do processo em nível de ETE ao objeto de determinar sua viabilidade econômica.

Este projeto de pesquisa utilizando o ácido tricloroisocianúrico para desinfecção do efluente de lagoa facultativa foi desenvolvido em dois trabalhos. Neste foi avaliada a formação do subproduto Trialometano (TAM) e o outro, desenvolvido por Campos (2014), avaliou-se a eficiência da desinfecção.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a formação de Trialometanos em esgoto tratado de uma lagoa facultativa, submetido a um sistema de desinfecção utilizando ATCI.

2.2 Objetivos Específicos

A pesquisa teve como objetivos específicos:

1. Avaliar a quantidade de cloro que o sistema é capaz de dosar através de experimentos variando vazão e área molhada;
2. Determinar a dosagem do ATCI e do hipoclorito de sódio necessária para desinfecção do efluente da lagoa facultativa, através de experimentos com variação da dosagem e do tempo de contato, para posterior comparação dos resultados;

3. Avaliar a eficiência do sistema na desinfecção do efluente de lagoa facultativa utilizando ATCI;
4. Avaliar o custo do sistema de desinfecção com ATCI utilizado no efluente da lagoa facultativa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Desinfecção

O interesse na desinfecção dos efluentes sanitários é cada vez maior, dada a crescente deterioração das fontes de abastecimento de água para uso humano (LAPOLLI, 2005). O objetivo do processo de desinfecção é a inativação seletiva de espécies de organismos presentes no esgoto sanitário, em especial aquelas que ameaçam a saúde humana, em consonância com os padrões de qualidade estabelecidos para diferentes situações (GONÇALVES, 2003).

A desinfecção dos esgotos deve ser considerada quando se pretende reduzir os riscos de transmissão de doenças infectocontagiosas, principalmente quando o contato humano, direto ou indireto, com as águas contaminadas, seja possível de ocorrer (CHERNICHARO, 2001, apud TONON, 2007). A desinfecção não necessariamente implica na destruição completa de todas as formas vivas (esterilização), apesar de muitas vezes o processo de desinfecção seja levado ao ponto de esterilização.

Segundo Mezzanotte (2007) a escolha de um método de desinfecção adequado é de grande importância, quando considerado um descarte adequado e uma possível reutilização dos efluentes tratados. O primeiro aspecto está relacionado não apenas a remoção dos agentes potencialmente patogênicos, mas também ao controle de formação de subprodutos de desinfecção.

A resistência de algumas espécies de microrganismos a desinfetantes específicos varia consideravelmente. Bactérias não-esporuladas são menos resistentes que as formadoras de esporos, enquanto que cistos e vírus possuem alta resistência (ROSSIN, 1987).

Outro fator de fundamental importância é a concentração de microrganismos, uma vez que uma densidade elevada corresponde a uma maior demanda de desinfetante. A aglomeração de organismos pode ocasionar uma barreira para penetração do desinfetante (MEYER, 1994)

Outra influência marcante no processo de desinfecção é a natureza do esgoto a ser tratado. As substâncias presentes no meio podem reagir com desinfetante, usando sua capacidade de oxidação e diminuindo sua ação bactericida (JORDÃO E PESSOA, 2011)

Segundo Meyer, 1994, a água sofre influência química de acordo com a temperatura do sistema, já que alguns compostos podem se apresentar sob formas diferentes, conforme a temperatura do meio. Geralmente a ação desinfetante é favorecida em temperaturas elevadas.

O processo de desinfecção desenvolve-se geralmente de forma gradativa, com a ocorrência de etapas físicas, químicas e bioquímicas, não sendo instantânea a inativação ou destruição dos microrganismos ocasionada pela ação dos desinfetantes (MEYER, 1994).

3.2. História da desinfecção

A desinfecção da água tem sido realizada por milênios, mesmo sem ter total conhecimento dos princípios envolvidos no processo. Existem indícios que a prática de

ferver a água já era recomendada em 500 A.C., mas alguns historiadores acreditam na adoção desta prática desde o início da civilização (LAUBUSCH, 1971 *apud* MEYER, 1994). Havia uma crença de que as doenças eram transmitidas através de odores, até Louis Pasteur estabelecer a teoria dos microrganismos em 1880. A desinfecção das águas e esgotos surgiu como uma tentativa de se controlar a propagação de doenças através de odores (MEYER, 1994). Segundo Pereira (2007) existem relatos em que anciões da Grécia Antiga sugeriam processo de desinfecção da água como a filtração através de carvão de lenha, a exposição à luz do sol, assim como seu aquecimento

O primeiro registro na história relacionado ao uso do cloro como desinfetante em sistema de esgotamento sanitário ocorreu em 1893, em Hamburgo na Alemanha (WHITE, 1999). Segundo Pianowski e Janissek (2003) nos países mais desenvolvidos, a prática da desinfecção de esgoto cresceu de forma lenta, mas continuamente entre os períodos de 1910 e 1970. Até a década de 70, o cloro foi utilizado quase que universalmente na desinfecção do esgoto. O desenvolvimento da desinfecção do esgoto está ligado ao desenvolvimento do processo de cloração. No Brasil, até o ano de 1995, a cloração de esgoto bruto ou tratado praticamente não existia, em razão do custo elevado e também pela deficiência na capacidade de tratamento em todo o país (JORDÃO e PESSOA, 1995 *apud* PIANOWSKI e JANISSEK, 2003).

3.3. Tecnologias de desinfecção

No processo de desinfecção usa-se basicamente um agente químico ou físico, com o objetivo de eliminar microrganismos patogênicos ou microrganismos indesejáveis presentes na água. Os processos específicos de desinfecção podem ser classificados como:

- Tratamento físico – aplicação de calor, irradiação, luz ultravioleta;
- Tratamento químico – cloração, ozonização e aplicação de outros compostos orgânicos e inorgânicos.

A desinfecção é uma das primeiras metodologias utilizadas no tratamento de águas para inativação de patógenos. Existem segundo USEPA (1999) três modos de ação dos desinfetantes:

- destruição da organização estrutural da célula;
- interferência no nível energético do metabolismo;
- interferência na biossíntese e no crescimento.

A ação dos desinfetantes químicos no tratamento da água ocorre pela oxidação ou ruptura da parede celular dos microrganismos, e a difusão do desinfetante no interior das células, com consequente interferência na atividade celular (USEPA, 1999). Enquanto a inativação dos microrganismos por desinfetantes físicos ocorre pela transferência de energia eletromagnética para o material genético, DNA ou RNA, por exemplo, radiação UV. Quando a radiação UV penetra na parede celular de um

microrganismo, a mesma destrói a habilidade das células de se reproduzirem (USEPA, 1999).

Dentre os processos biológicos mais utilizados para tratamento de esgotos, destacam-se as lagoas de estabilização, que não apresentam elevadas eficiências de remoção de coliformes, indicando que as plantas de tratamento com a finalidade de remoção da matéria orgânica não são suficientes para obtenção de efluentes com qualidade microbiológica adequada (CAMPOS, 1993), sendo assim necessária a utilização de algum processo de desinfecção.

De acordo com Acher et. al. (1997) os oxidantes mais utilizados para desinfecção de esgotos domésticos são o cloro gás (Cl_2), hipocloritos (ClO^-), cloraminas (RNHCl), dióxido de cloro (ClO_2), bromo (Br_2) e ozônio (O_3) e que a eficácia dos desinfectantes decresce na seguinte ordem:



3.4. Cinética da desinfecção

Segundo Sundfeld (2012), a informação essencial para o sistema de desinfecção é a taxa de inativação dos organismos-alvos. O efeito da concentração ou da intensidade do agente desinfectante sobre a velocidade de destruição dos organismos é imprescindível para associação com o tempo de contato e definição das doses a serem utilizadas. Ambientes distintos que possuem influência direta nos mecanismos de desinfecção dificultam a criação de um modelo matemático que consiga atender universalmente todas as condições onde a desinfecção possa ser aplicada. O preceito fundamental da cinética da desinfecção foi enunciado por Chick em 1908, o qual percebeu que o número remanescente de microrganismos (N) na água decresce com o tempo (t) de contato com o desinfectante, ou seja, quanto maior o tempo de

contato com o desinfetante, maior é o número de microrganismo inativado, de acordo com a equação 3.1 e posteriormente integra-se para formar a equação 3.4 substituindo os limites ($N = N_0$ e $t = 0$).

Na prática, comumente são observadas discrepâncias em relação ao decaimento exponencial, reconhecendo-se a influência de diversos fatores, como as mudanças na concentração do agente desinfetante no decorrer do tempo, as diferenças entre as resistências de diversos organismos presentes na mesma cultura com idades diferentes, a ocorrência de aglomerados de microrganismos ou a oclusão pelos sólidos em suspensão (USEPA, 1999).

$$N = N_0 \times \exp(-K \times t) \quad (3.1)$$

Onde:

N – concentração de microrganismos ativos no tempo t após a descarga no rio, $N^\circ.L^{-3}$

N_0 – concentração inicial de microrganismos ativos no ponto de lançamento, $N^\circ.L^{-3}$;

K – coeficiente de decaimento, T^{-1}

t – tempo transcorrido, T .

A equação 3.1 representa o modelo básico para decaimento por morte natural em ambientes lóticos, como nos rios. O modelo de primeira ordem para corpos d'água lênticos, como represas é representado na equação 3.2:

$$N = \frac{N_0}{1 + K \times t} \quad (3.2)$$

onde t representa o tempo de detenção hidráulica médio, numericamente igual à relação entre volume e vazão ($t = V/Q$).

Para considerar o efeito da concentração, Watson, em 1908, partiu de considerações semelhantes de Chick, considerando que a concentração de desinfectante é constante no tempo, como apresentado na equação 3.3 (SUNDEFELD, 2012).

$$n = N_0 \times \exp(-K_d \times C^n \times t) e^{-k \times c \times t} \quad (3.3)$$

Onde:

$K = K_d \times C^n$ número de organismos sobreviventes no tempo t_1

K_d = Constante de decaimento ($L^n/mg^n \cdot \text{min}$)

C – concentração do desinfectante (mg/l)

n = Coeficiente (adimensional)

Alguns valores desses coeficientes cinéticos estão disponíveis na literatura ou podem ser obtidos experimentalmente. Sofrem grande influência da temperatura que, quanto maior, provoca aumento na taxa de decaimento, tanto em rios como em lagos (Usepa 1986). Na tabela 3.1 estão apresentados exemplos de valores de K' e n em função do pH e temperatura do meio, para equacionamento de inativação de microrganismos com agente desinfectante químico.

Tabela 3.1 Valores de K_d em função do pH e temperatura.

Cloro combinado (K_d expresso como ($mg/l^n \cdot \text{min}$))				
Microrganismo	pH	Temperatura	K_d	n
Escherichia coli	6,5	20-25	0,483	1,07
Escherichia coli	7,0	20-25	0,316	1,04
Escherichia coli	7,8	20-25	0,193	1,18
Escherichia coli	8,5	20-25	0,0854	1,125
Escherichia coli	9,5	20-25	0,049	1,37
Escherichia coli	10,5	20-25	0,125	2,27

Fonte: Sundefeld. (2012)

A desinfecção por meio da cloração foi modelada por Selleck no ano de 1970. A equação relaciona o decaimento bacteriano com a concentração de cloro residual e necessita de boa mistura do desinfetante no ponto de aplicação e que não ocorram curtos-circuitos ao longo do tanque (PIVELI, 2003) para reproduzir fielmente os resultados

$$\frac{N}{N_0} = (1 + 0,23 \times C \times t)^{-3} \quad (3.4)$$

Onde:

N – número de organismos sobreviventes no tempo t_1 (NMP)

N_0 – número de organismos no tempo t_0 (NMP)

C – concentração do desinfetante (mg/l)

t – tempo (minutos)

3.5. Interferências do processo de desinfecção

Para que o processo de desinfecção consiga alcançar o desempenho esperado e remover de forma eficiente os patógenos, vários fatores que interferem no processo devem ser considerados, como a concentração e tipo do agente desinfetante, temperatura, tempo de contato, concentração de organismos, tipo de organismos e natureza do meio (CHERNICHARO, 2001).

Segundo Gonçalves (2003) na elaboração de um projeto de sistema de desinfecção de esgoto torna-se necessário o conhecimento da taxa de inativação do microrganismo indicador pelo agente desinfetante. Particularmente, o efeito da concentração do agente desinfetante sobre a taxa desse processo determinará a

combinação mais eficiente entre o tempo de contato e a concentração de desinfectante a utilizar. Na desinfecção de esgotos com compostos de cloro, a concentração do desinfectante se altera com o tempo e, em particular durante os momentos iniciais da aplicação do cloro, passa por transformações rápidas, desde a forma livre até as formas combinadas.

A concentração de microrganismos é outro fator que afeta a desinfecção, já que densidades elevadas de microrganismos demandam tempo de atuação mais prolongado do desinfectante, elevando seu consumo. A temperatura atua de forma diferente, pois influencia a velocidade das reações, assim temperaturas mais elevadas abreviam o tempo de desinfecção (MEYER, 1994). O meio onde ocorre a desinfecção também deve ser levado em consideração, pois materiais orgânicos presentes reagem com os agentes oxidantes do processo de desinfecção reduzindo sua eficiência (CHERNICHARO *et.al.*, 2001).

A presença de sólidos no efluente pode proteger os microrganismos da ação desinfectante. O pH do efluente é outro aspecto relevante que interfere na desinfecção, pois a inativação de microrganismos aumenta com o decréscimo do pH (GONÇALVES, 2003).

Piveli (2005) aponta que a cloração para desinfecção dos esgotos não é um processo muito recomendável, especialmente nos esgotos brutos ou “in natura” e até mesmo esgoto com tratamento secundário, pois estes são muito ricos em partículas que competem e protegem os microrganismos da ação do cloro

O trabalho de Campos (2014) é um complemento a esta pesquisa, pois nestas mesmas condições, avalia a remoção de coliformes com o uso do ácido tricloroisocianúrico como desinfectante de efluente de lagoa de estabilização, considerando a influência de determinados fatores na eficiência deste agente desinfectante.

3.6. Características desejáveis de um desinfectante

Acher et. al. (1997) cita que a seleção de um agente desinfectante é bastante complexa, pois propriedades germicidas são dependentes de outros fatores relacionados aos parâmetros de qualidade das águas, os quais causam influências nos processos de desinfecção. Os fatores que possuem mais influência sobre a eficiência dos agentes desinfectantes são: sólidos suspensos, material oxidável orgânico e inorgânico, oxigênio dissolvido, pH e temperatura.

As principais características que se deseja de um desinfectante são as seguintes (MEYER, 1994):

- Capacidade de destruir em tempo razoável, os organismos patogênicos a serem eliminados, na quantidade em que se apresentam e nas condições encontradas na água;
- Desinfectante não deve ser tóxico para o homem e para os animais domésticos e, nas dosagens usuais, não devem causar à água cheiro e gosto que prejudiquem o seu consumo;
- Custo de utilização deve ser razoável, além de apresentar facilidade e segurança no transporte, armazenamento, manuseio e aplicação;
- Concentração na água tratada deve ser fácil e rapidamente determinável;
- Devem-se produzir concentrações residuais persistentes na água de maneira a constituir barreira sanitária contra eventual recontaminação antes do uso.

Na Tabela 3.2 é apresentada uma comparação dos desinfetantes atualmente utilizados.

Tabela 3.2 Propriedades dos desinfectantes

Condição	Cloro	Ozônio	Ultravioleta
Produce THM ou outros subprodutos	S	O	N
Produce orgânicos oxidados	O	S	O
Sofre Impacto pela turbidez	N	O	S
Inativa <i>Giardia</i> - < 2,0 log / > 2,0 log	S / N	S/S	N/N
Inativa <i>Cryptosporidium</i> - > 2,0 log	N	S	N
Inativa Vírus - > 2,0 log	S	S	S
Desinfetante Secundário	S	N	N
Qualificação do Operador (1=baixo; 5=alto).	1	5	3
Aplicável em grande escala	S	S	N
Aplicável em pequena escala	S	S	S

S = sim, N = não, O = ocasionalmente.

Fonte: adaptado de WHITE (1999).

3.7. Evolução dos processos de cloração

Inicialmente aplicava-se o cloro na desinfecção de águas somente em casos de epidemia. Uma das primeiras utilizações de cloro documentadas ocorreu no ano de 1850, quando John Snow usou o cloro para desinfetar água na estação de tratamento na cidade de Londres depois de uma epidemia de cólera (WHITE, 1999).

A cloração foi aplicada em escala de estações de tratamento pela primeira vez em Hamburgo no ano de 1883. Em relação à desinfecção de esgotos, a primeira aplicação foi noticiada por Soper na Inglaterra em 1879 para tratar as fezes de pacientes com febre tifoide (WHITE, 1999).

O cloro, apesar do seu enorme potencial de uso, ainda em 1930 era considerado apenas um subproduto da fabricação eletrolítica da soda cáustica e somente após a segunda guerra mundial sua utilização expandiu-se de forma crescente (CETESB, 1974).

Conforme citado por Meyer (1994), os processos de cloração evoluíram com o tempo, podendo ser caracterizado da seguinte maneira:

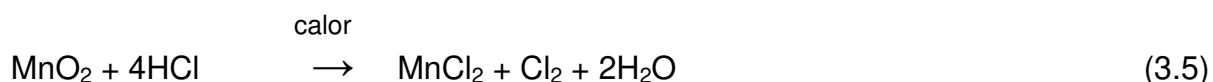
- A partir de 1902 - A cloração foi adotada de maneira contínua na Bélgica;
- 1908 a 1918 – Iniciou-se o uso da técnica de cloração das águas; e posterior aplicação de uma pequena quantidade de cloro;
- 1918 a 1928 - Houve uma acentuada expansão no uso de cloro líquido;
- 1928 a 1938 - Uso de cloraminas, adição conjunta de amônia e cloro, de modo a se obter um teor residual de cloraminas. Ainda não eram empregados testes específicos para se determinar os residuais de cloro;
- 1948 a 1958 - Refinamento da cloração; determinação das formas de cloro combinado e livre; e cloração baseada em controles bacteriológicos.

A cloração é um importante método de desinfecção para esgotos municipais, apesar de ser o método de desinfecção mais antigo (WHITE, 2010).

Nos dias atuais, percebe-se um movimento em vários países para substituir o cloro nos processos de desinfecção de esgoto por agentes que não formem subprodutos e seja ambientalmente inócuo. Entretanto, como um sistema reconhecido e consolidado, a cloração tem sido ainda bastante utilizada (CAMPOS, 2014).

3.8. Cloro e seus derivados

O cloro foi descoberto na fase gasosa em 1774 pelo químico sueco Karl W. Scheele, quando ele aqueceu um óxido de manganês com ácido clorídrico conforme equação 3.5.



O cloro é um elemento da família dos halogênios, não sendo encontrado em estado puro na natureza, devido a sua alta reatividade. É encontrado em cloretos e cloratos, sobretudo na forma de cloreto de sódio nas minas de sal gema e dissolvido na água do mar. O cloro é obtido principalmente (mais de 95% da produção) a partir da eletrólise do cloreto de sódio, NaCl, em solução aquosa, denominado processo de cloro-álcali.

O cloro possui um forte cheiro, o que o torna extremamente irritante para as vias respiratórias. Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais propriedades físicas do cloro.

Tabela 3.3 Propriedades físico-químicas do cloro

Propriedade	Valores
Peso atômico	35,43
Peso molecular	70,91
Ponto de ebulição	- 34,6 °C
Ponto de fusão	- 101,0 °C
Densidade a 0°C e 1 atm	3,21 g/L
Solubilidade em água a 0°C e 1 atm	14,6 g/L

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2003)

Silva (2008) cita que em todo o mundo o agente químico mais utilizado no processo de desinfecção de águas de abastecimento e residuárias é o cloro. Para a desinfecção de águas residuárias, o cloro pode ser encontrado comercialmente nas formas gasosa (Cl_2), líquida (hipoclorito de sódio) e sólida (hipoclorito de cálcio). O cloro proporciona a inativação efetiva de uma ampla quantidade de patógenos, a permanência de residual de fácil mensuração e controle, simplicidade do sistema, viabilidade econômica independente do tamanho da planta, e extensivo histórico de utilização com sucesso (GONÇALVES, 2003 apud TONON, 2007).

Silva (2008) cita que por muitas décadas a cloração tem sido o método mais utilizado de desinfecção, devido a sua eficiência, seu baixo custo e sua relativa

facilidade de aplicação, mas que nos últimos anos tem havido uma preocupação maior com a possível toxicidade dos agentes desinfectantes e os respectivos subprodutos da desinfecção.

Todos os processos de desinfecção de esgoto disponíveis para utilização possuem qualidades e limitações, devendo ser feita a escolha por aquele que atenda as necessidades de cada situação em particular.

As vantagens e desvantagens da desinfecção pelo processo de cloração podem ser observadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Comparação dos processos de desinfecção

Processos	Vantagem	Desvantagem
Lagoa de estabilização	▪ Processo natural, sem mecanização ▪ Não gera compostos tóxicos prejudiciais ▪ Operação simples ▪ Realizada concomitantemente à estabilização da matéria orgânica	▪ Necessita de grandes áreas ▪ Tempo de detenção longo (dias) ▪ Desempenho depende das condições climáticas ▪ Produz grande quantidade de algas
Cloração	▪ Tecnologia bem conhecida ▪ Menor custo ▪ Residual de cloro prolonga a desinfecção aumentando a eficiência ▪ Efetiva e confiável para grande maioria dos patógenos ▪ Oxida compostos orgânicos e inorgânicos ▪ Flexibilidade nas dosagens	▪ Cloro residual é tóxico e requer descloração ▪ Todas as formas de cloro são corrosivas e tóxicas ▪ Geração de subprodutos tóxicos (TAM e HAA) ▪ Aumenta os sólidos dissolvidos totais ▪ Ineficaz para alguns patógenos (protozoários, helmintos)
Cloração/descloração	▪ Idem cloração	▪ Idem cloração ▪ Requer produto químico para eliminar o residual de cloro ▪ Não tem efeito residual da desinfecção com cloro
Ozonização	▪ Mais efetivo que o cloro na eliminação de vírus e bactérias ▪ Necessita curto tempo de contato (10 a 30 minutos) ▪ Não gera subprodutos tóxicos ▪ Recrescimento bacteriano ocorre somente na presença de material particulado ▪ Gerado no local de uso ▪ Eleva o OD no efluente tratado	▪ Pequenas doses podem não ser efetivas para alguns vírus, esporos e cistos ▪ Tecnologia mais complexa que do cloro e UV ▪ O₃ é muito reativo, corrosivo, irritante e tóxico ▪ Caro para esgoto com elevado teor de SST e DQO ▪ Custo relativamente alto

Tabela 3.4 Comparação dos processos de desinfecção. (Continuação)

Acido Peracético	▪ Efetivo na inativação bactérias, vírus e esporos ▪ Toxicidade residual e formação de subprodutos inferior ao cloro ▪ Necessita de curto tempo de contato ▪ Ausência de residuais tóxicos	▪ Perde eficiência na presença de SST e DQO ▪ Custo elevado ▪ Altamente instável e reativo
	▪ Efetiva na inativação vírus e esporos ▪ Dispensa geração, transporte, armazenamento e manuseio de produtos químicos ▪ Não gera efeito residual prejudicial ▪ Operação simples ▪ Necessita curto tempo de contato (20 a 30 segundos) ▪ Utiliza pouco espaço	▪ Baixas dosagens não são efetivas para alguns vírus, esporos e cistos ▪ Recrescimento dos microrganismos por fotorreativação e recuperação no escuro ▪ Demanda controle da formação de biofilme no reator de contato ▪ Perde eficiência na presença de SST e turbidez ▪ Mais caro que a cloração e mais econômico que a cloração/descloração
Filtração terciária	▪ Melhora significativamente a qualidade físico-química do efluente ▪ Remove fósforo do esgoto ▪ Eficiente inclusiva na remoção de larvas e ovos de helmintos e cistos de protozoários	▪ Eficiência variável e inespecífica em relação aos patógenos ▪ Requer processos anteriores de coagulação/floculação ▪ Funcionamento intermitente devido à lavagem dos filtros ▪ Demanda operacional de nível intermediário ▪ Custo elevado

Fonte: Adaptado de Usepa (1986), Tchobanoglous & Burton (1991), Von Sperling (1996), Campos (1999) e Sant'Ana (2002) apud Gonçalves et. al. (2003) e adaptado de Daniel (2005)

3.8.1 Cloro gás

O cloro molecular (Cl_2) é um gás de coloração amarelo esverdeada com forte odor irritante. É resultado da eletrólise da solução de cloreto de sódio em água. Para melhor manipulação e transporte é pressurizado a baixa temperatura para ser liquefeito, transformando-se líquido sendo comercializado e transportado através de cilindros pressurizados. O gás cloro é mais denso que o ar e pode se acumular próximo ao solo, porém por ser muito reativo não permanece por muito tempo no ambiente. Na atmosfera sofre fotólise formando radicais cloro que reagem com qualquer molécula

orgânica presente no ar, subtraindo desta um hidrogênio e formando o ácido clorídrico (CETESB 2012).

Quando adicionado na água o cloro gás hidrolisa-se rapidamente para formar o ácido hipocloroso, conforme reação 3.6. Dependendo dos valores de pH da água, o ácido hipocloroso (HClO) se dissocia formando o íon hipoclorito (OCl⁻), em diferentes níveis de concentração, conforme a equação 3.7 (DI BERNADO, 1993).



Valores de pH entre 6,5 e 8,5, a dissociação é incompleta e as espécies HClO e OCl⁻ aparecem simultaneamente. Para valores de pH menores que 6,5, praticamente não ocorre a dissociação do HClO e valores acima de 8,5 a dissociação é completa. Como germicida, os efeitos do HClO são muito maiores do que os do OCl⁻ aparecem, sendo preferível a cloração com valores baixos de pH (USEPA 1999).

3.8.2 Hipocloritos

O hipoclorito de cálcio Ca(OCl)₂ é encontrado na forma sólida, com concentração de cloro disponível superior a 70%, sendo relativamente estável na forma seca (perda aproximada de concentração igual a 0,013% por dia). Sua obtenção ocorre do precipitado resultante da dissolução do cloro gás em solução de óxido de cálcio e hidróxido de sódio (USEPA, 1999).

O hipoclorito de cálcio na água também reage formando o ácido hipocloroso, conforme reação 3.8; com consequente elevação do pH pela liberação do íon OH⁻.



O hipoclorito de sódio possui coloração amarelo claro e é encontrado na forma líquida (solução), em concentrações que usualmente variam de 1% a 16%. Sua obtenção ocorre através da dissolução do cloro gás em solução de hidróxido de sódio.

O hipoclorito de sódio (NaOCl) é o produto mais adequado para a cloração em sistemas simples e de pequeno porte, em virtude da facilidade de aplicação em pequenas vazões operacionais, do manuseio e armazenamento e do baixo custo (GONÇALVES, 2003).

Na água, o hipoclorito de sódio reage formando o ácido hipocloroso, conforme reação 3.9.



Tonon (2007) cita que são empregadas técnicas de cloração com utilização de reagentes alternativos como o hipoclorito de cálcio, cloraminas e dióxido de cloro, além do cloro gasoso e do hipoclorito de sódio.

3.8.3 Dióxido de cloro

O dióxido de cloro é um composto químico com fórmula Cl_2 , é gasoso e com coloração amarelo. O dióxido de cloro possui alta solubilidade, quando adicionado na água não hidrolisa, permanecendo como gás dissolvido.

O dióxido de cloro é uma molécula relativamente pequena, volátil e energética. Entretanto, ele é estável em soluções diluídas, desde que abrigado da luz solar. É o

mais efetivo desinfetante e o agente oxidante mais forte entre todos contendo cloro. Uma das grandes vantagens do uso está no fato de que não reage com amônia, evitando assim a formação de cloraminas potencialmente tóxicas. Além dessas vantagens o dióxido de cloro opera em doses pequenas, não favorece a formação de trialometanos (TAM), apresenta efetiva ação desinfetante sob todos os tipos de microrganismos (bactérias, protozoários e vírus) e as propriedades biocida não são influenciadas pelo pH (CAMARGO, 2004).

O dióxido de cloro oxida outras substâncias através de um mecanismo de transferência de um único elétron, onde o ClO_2 é reduzido a clorito (ClO_2^-), sem produção de hipoclorito ou cloro gasoso, conforme reação 3.10 (USEPA, 1999).



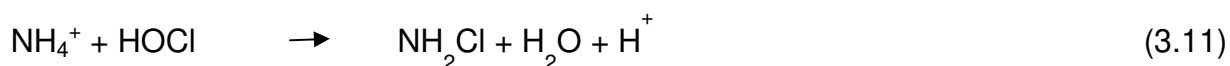
3.8.4 Cloro combinado

Segundo Jordão e Pessoa (2011) a matéria orgânica se combina com o cloro formando compostos de fraca ou quase nenhuma ação desinfetante. Este fenômeno adquire especial importância e característica quando se trata da matéria orgânica nitrogenada.

O cloro e seus derivados apresentam alto poder oxidante e reagem com vários compostos presentes nos esgotos. A demanda de cloro, calculada pela diferença entre a dose inicial e o residual de cloro, é proveniente dessa variedade de reações nas quais o cloro é consumido por vários constituintes da água residuária e por decomposição. De modo simplificado, o cloro reage com a amônia para produzir uma série de compostos chamados cloraminas e, eventualmente, oxida a amônia em gás nitrogênio (N_2). O mecanismo de reação é complexo, e os produtos variam com o pH, razão entre o cloro

adicionado e a amônia presente e o tempo de contato. A monocloramina (NH_2Cl) e a dicloramina (NHCl_2), denominadas cloro combinado, têm poder desinfetante, apesar deste ser inferior ao dos produtos resultantes da dissociação de qualquer forma de cloro na água, conhecidos como cloro livre (HOCl e OCl^-). As reações com outros compostos inorgânicos como o sulfeto de hidrogênio (H_2S) ocorrem imediatamente após a aplicação do cloro (GONÇALVES, 2003).

A amônia presente na água reage com o cloro e resulta na formação das cloraminas:



Cada um desses três compostos, monocloramina (NH_2Cl), dicloramina (NHCl_2) e tricloramina (NCl_3), contribuem para o residual de cloro combinado.

A concentração de cloro residual total é a soma de cloro residual livre e cloro residual combinado. Quanto maior a concentração de cloro residual livre, menor é a concentração de cloro residual combinado. De acordo com Meyer (1994), quanto maior é a quantidade de cloro residual combinado formado, menor é a chance de se produzir os chamados trialometanos, compostos denominados organoclorados e que possuem alto potencial carcinogênico. Tonon (2007) cita que é preferível a formação das cloraminas por se tratar de substâncias que ajudam na desinfecção. O inconveniente é que esses compostos não deixam um residual na rede assim como os compostos de cloro (gás, líquido ou sólido).

O pH exerce influência decisiva nas e nas espécies que se formam quando a dosagem de amônia, o tempo de reação e a temperatura permanecem inalterados. Observam-se uma vez mais aqueles valores de pH para os quais é maximizada a

produção de tricloramina, dicloramina ou monoclорamina. Verifica-se que, para valores altos de pH, não há a tricloramina (DI BERNADO, 1993 apud GONÇALVES, 2003). Na Tabela 3.5 são apresentadas as principais propriedades físicas, químicas e termodinâmicas das cloraminas.

Tabela 3.5 Principais propriedades das cloraminas

Parâmetro	Monoclорamina	Dicloramina	Triclororamina
Ponto de fusão(°C)	-66	ND	-40
Ponto de ebulição(°C)	(*)	ND	70
Cor	Sem cor	ND	Amarela
pH predominante de formação	7-11	4,4-7,0	<4,4
Relação predominante de Cl ₂ /NH ₃ em pH = 7 e temperatura = 25°C	<5,0	5,0-7,6	>7,6
Energia de ativação (Kcal)	3	7,3	5,2
Constante de equilíbrio a 25°C(M ⁻¹)	1,5x10 ¹⁰	2,3x10 ⁸	1,06x10 ⁹
Comprimento de onda correspondente à absorbância máxima (nm)	243	294	336
Taxa de formação a 25°C(M ⁻¹ s ⁻¹)	2,9x10 ⁶	2,3x10 ²	3,4
Taxa de hidrólise a 25°C(s ⁻¹)	1,9x10 ⁻⁵	6,5x10 ⁻¹	3,2x10 ⁻⁵

Nota: (*) pode ser explosiva em temperatura ambiente

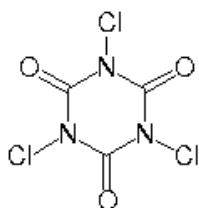
ND = não detectada

Fonte: DI BERNADO(1993), citando WATTS(1995); GONÇALVES(2003).

3.8.5 Ácido Tricloroisocianúrico

O uso de compostos de cloro, como o ácido tricloroisocianúrico, foi aprovado pela USEPA/USA(*) em julho de 2001 para uso em água para consumo humano. Ácido tricloroisocianúrico é fabricado na forma de tabletes e granular. O Tablete de ácido tricloroisocianúrico é um material granular prensado e possui uma concentração de cloro disponível elevada sendo manuseado de forma fácil e segura. O Ácido tricloroisocianúrico para tratamento de água é produzido a partir da reação química de ácido cianúrico e compostos de cloro na presença de água (MATTOS, 2004). É um derivado de cloro de origem orgânica devido a possuir carbono na sua estrutura química, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fórmula estrutural do ATCI



Fonte: Google (2014)

Mattos (2004) cita que o uso de ácido tricloroisocianúrico na planta de tratamento de água de Guararema, São Paulo, Brasil, apresentou vantagens significativas como: maior estabilização de residual de cloro nas etapas de coagulação química, floculação, sedimentação e com pequena redução nos filtros rápidos, estabilização similar na rede de distribuição de residual de cloro quando comparado com o agente de desinfecção cloro líquido, interferência no pH da água bruta semelhante ao cloro gasoso possibilitando redução de consumo de produtos químicos coagulante e alcalinizante e atendimento ao padrão de portaria, menor demanda de residual de cloro com o aumento de volume de lodo gerado no processo, praticamente nenhuma perda de cloro no meio ambiente reduzindo efeitos prejudiciais à saúde dos operadores e facilidade no manuseio e reposição do material sem riscos de ocorrência de vazamentos de cloro.

O ácido tricloroisocianúrico possui entre outras vantagens, além das citadas acima, o fato de apresentar uma concentração de cloro disponível de igual ou maior do que 90,0 % (MATTOS, 2004). As características mais importantes do ácido tricloroisocianúrico são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Características do ácido tricloroisocianúrico

Propriedade	Valores
Peso molecular	232,5
Temperatura de decomposição	234 °C
Ponto de fusão	249 a 251 °C
Cloro ativo	91 %
Solubilidade em água a 20°C e 1 atm	12 g/L

Fonte: Adaptado de Cunha et. al. (2006)

A reação química de ácido tricloroisocianúrico com a água resulta na formação de três moléculas de ácido hipocloroso mais uma molécula de ácido isocianúrico conforme apresentado na equação 3.14. Segundo Macedo (2003), a probabilidade de formação de Trialometanos com o uso dos derivados clorados de origem orgânica é muito pequena ou nula.



O Ácido Tricloroisocianúrico ATCI é denominado comercialmente de Simclosene, Cloreal ou ACL-85. Sua obtenção ocorre, entre outras formas, pela reação entre o ácido cianúrico e o bicarbonato de sódio com formação do sal sódico do ácido cianúrico, o qual é posteriormente clorado. Classificado como N-cloramina orgânica é utilizado na desinfecção de água (abastecimento, resfriamento e piscinas), desinfecção de ambientes, tubulações e equipamentos, em sínteses orgânicas e na indústria de alimentos (CUNHA et. al., 2006 apud CAMPOS, 2014). A Tabela 3.7 traz valores de pH dos principais produtos clorados.

Tabela 3.7 Valores de pH da solução a 1% dos principais produtos clorados

Produto	pH da solução a 1%
Hipoclorito de sódio	11,5 - 12,5
Hipoclorito de cálcio	10,5 – 11,5
Ácido tricloroisocianúrico	2,7 – 2,9

Fonte: Macedo (2004)

3.9. Formas de aplicação do cloro no esgoto

Segundo Gonçalves (2003) a desinfecção utilizando cloração geralmente está situada no final do tratamento secundário. O cloro para desinfecção pode ser utilizado

nas formas líquida, sólida ou gasosa. A aplicação de solução aquosa de hipoclorito pode se dar por meio de bombas dosadoras ou de hidrojatores. A aplicação do gás cloro, tipo direto, é recomendada para locais onde não há água sob pressão para operar o injetor. Na forma sólida, o hipoclorito de cálcio e o ácido tricloroisocianúrico podem ser aplicados através da utilização de um clorador de pastilhas.

O cloro depois de aplicado no esgoto necessita de um tempo de contato para possibilitar adequada desinfecção, o que normalmente é feito através da utilização de um tanque de contato. Para tal, pelo menos 80% a 90% do esgoto deve ficar retido no tanque de contato por um determinado intervalo de tempo. A melhor forma de conseguir isso é pelo uso de tanques com regime de escoamento de fluxo pistão (*plug flow*). Esses tanques devem apresentar relações comprimento:largura de ao menos 10:1 (CHERNICHARO, 2001) e, preferencialmente, da ordem de 40:1, a fim de minimizar a ocorrência de curto-circuito (GONÇALVES, 2003).

Jordão e Pessoa (2011) citam que a garantia de que o tempo de contato foi obedecido é dada pela passagem do esgoto a ser clorado num tanque de contato, dimensionado de forma a reter o líquido no tempo especificado e com boas características de mistura do esgoto e do cloro aplicado.

3.10. Dosagens de cloro requeridas para desinfecção de esgotos

Gonçalves (2003), afirma que as dosagens de cloro requeridas para desinfecção dependem de uma série de fatores, notadamente das características do esgoto. Nesse sentido, usualmente são desenvolvidos estudos de laboratório para determinar as concentrações ótimas de cloro, a fim de atingir uma determinada eficiência de desinfecção.

A determinação da dosagem de cloro e o projeto das instalações de desinfecção dependem das metas a serem atingidas, em função das diretrizes estabelecidas pela legislação ambiental. O sistema de desinfecção pode ser projetado em função do residual de cloro livre a ser mantido no efluente final ou em função do número máximo de organismos indicadores (usualmente coliformes fecais) admitidos para o efluente final (CORAUCCI *et.al.*, 2003).

A necessidade de dosagens mais elevadas de cloro para a destruição de vírus favorece a teoria de que a ação bactericida ocorra por ação enzimática, sendo os vírus desprovidos de enzimas, a sua destruição só é possível por oxidação direta da matéria protéica, o que exige muito mais cloro (SILVA, 2008).

A eficiência da cloração é função também do produto do cloro a ser utilizado e dos produtos formados após sua aplicação ao esgoto. Por isto, a adição de quantidades iguais de compostos diferentes de cloro como por exemplo: gás cloro e hipoclorito, não provoca a mesma ação e tem consequências diferentes de acordo com o pH formado e as respectivas concentrações de ácido hipocloroso (HClO) e íon hipoclorito (OCl⁻), pois o gás cloro tende a baixar o pH inicial, possuindo maior eficiência que os hipocloritos que tendem a elevar o pH (JORDÃO e PESSOA, 2011).

Diferentemente da desinfecção de água, a desinfecção de esgotos não é exigida a inativação total dos microrganismos. Assim é possível variar o tempo de contato e a dosagem, conforme o uso ou a disposição que será aplicada ao efluente desinfectado (CORAUCCI FILHO *et al.*, 2003). A Tabela 3.8 apresenta valores típicos de dosagens para diversos tipos de efluentes.

Tabela 3.8 Dosagem típica de cloro para desinfecção de esgotos brutos e tratados

Aplicação	Faixa de dosagem (mg/L)
Esgoto bruto (pré-cloração)	6 – 25
Efluente primário	5 - 20
Efluente de tratamento físico-químico	2 – 6
Efluente de filtros percoladores	3 – 15
Efluente de lodos ativados	2 – 8
Efluente filtrado (após tratamento em lodos ativados)	1 - 5
Efluente de lagoa de estabilização	6 - 13

Fonte: Metcalf & Eddy (1991); Wef (1992) apud Chermicahro (2001) e adaptado de Coraucci et. al. (2003)

3.11. Toxicidade de residual do cloro

De acordo com El-Rehaili (1995) apud Léo (2008), foi nos anos setenta que surgiu o interesse sobre os aspectos negativos da cloração, principalmente em relação à supercloração. Isto muito em função da toxicidade causada pelo cloro residual aos peixes e outros organismos aquáticos sensíveis e também pela observação da formação de subprodutos tóxicos e carcinogênicos como os Trialometanos e outros compostos clorados.

Silva (2008), cita que foi a partir de 1974 que cresceu a preocupação com a presença de compostos organoclorados em águas desinfectadas, devido ao fato de colocarem em risco a saúde dos seres humanos, animais e peixes.

O clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano, bromofórmio, ácido dicloroacético, ácido tricloroacético, dicloroacetronitrila, dibromoacetronitrila, dentre outros subprodutos foram classificados como prováveis ou possíveis carcinogênicos (USEPA, 1999).

Tominaga e Midio (1999) apud Léo (2008) citam que a hepatotoxicidade e a nefrotoxicidade características dos Trialometanos podem ser exacerbadas mesmo para

exposições a baixas concentrações. Quanto aos efeitos mutagênicos, foram observadas aberrações cromossômicas nas células de medula óssea de ratos *in vivo*. A carcinogenicidade pode ser evidenciada com o surgimento de tumores malignos em rins e tireoide de diferentes populações de ratos submetidas à exposição ao clorofórmio.

Dados toxicológicos demonstram que o clorofórmio, em dose elevada é um carcinógeno em roedores como ratos e ratazanas. Como o metabolismo destes animais é qualitativamente semelhante ao do homem, existe a suspeita que seja um carcinógeno humano (SILVA, 2008).

3.12. Remoção de cloro residual

O cloro resultante da desinfecção dos efluentes é responsável por causar uma elevada toxicidade, principalmente aos organismos aquáticos e deve ser monitorado através de padrões ambientais estabelecidos. A Resolução Conama 357/2005 estabelece o padrão ambiental de 0,010 mg/l para corpo receptor de classe 2.

A descloração do efluente quando necessária, pode ser realizada utilizando a aplicação carvão ativado, dióxido de enxofre, sulfito de sódio, metabissulfito de sódio e tiosulfato de sódio (LÉO, 2008).

Para a descloração do cloro livre (Cl^2), pode ser empregado carvão ativado e peróxido de hidrogênio, com a vantagem de controlar odores, como mostra a tabela 3.9 (Gonçalves, 2003).

Tabela 3.9 Propriedades dos agentes desclozantes e dosagens

Agente desclozante	Dosagem (mg. L ⁻¹ Cl ₂ residual)		
	Nome	Fórmula	Razão Estequiométrica
			Faixa de uso
Dióxido de enxofre		SO ₂	0,903
Sulfito de sódio		Na ₂ SO ₃	1,775
Bissulfito de sódio		NaHSO ₃	1,465
Metabissulfito de sódio		Na ₂ S ₂ O ₅	1,338
Tiosulfato de sódio		Na ₂ S ₂ O ₃	0,556

Fonte: Gonçalves (2003)

Tonon (2007) cita que muitos dos agentes desclozantes, principalmente dióxido de enxofre e sulfitos podem provocar irritação no trato respiratório superior e alguma neurotoxicidade a altas concentrações inaladas.

Segundo Léo (2008), a utilização do tiosulfato de sódio como agente desclozante geralmente é restrita devido ao elevado tempo de contato necessário. O dióxido de enxofre possui uma utilização mais ampla, devido a reagir com todas as formas de cloro livre, porém sua manipulação possui riscos de acidentes consideráveis. O bissulfito de sódio dentre outros compostos pode ser utilizado como sequestrante de cloro residual livre com maior segurança e menor custo.

3.13. Formação de subprodutos da desinfecção por cloração

O cloro reage com a matéria orgânica presente nos efluentes ou nos corpos d'água para formar compostos halorgânicos, ou organoclorados, em que predominam trihalometanos (TAMs) e ácidos haloacéticos (AHA). A quantidade total de haloorgânicos é denominada halogênios orgânicos totais (JORDÃO e PESSOA, 2011).

Um inconveniente da desinfecção com cloro e seus compostos é a produção de subprodutos prejudiciais à saúde humana. As duas maiores classes de subprodutos oriundos da cloração são os trihalometanos e os ácidos haloacéticos, ambos com potencial carcinogênico reconhecido. Dentre os fatores que interferem na produção desses subprodutos estão o pH, a temperatura, a concentração do desinfetante, o brometo, o nitrato e a concentração de nitrogênio amoniacal e de carbono orgânico (GONÇALVES, 2003).

A Tabela 3.10 mostra as principais substâncias halogenadas que tem sido identificadas nas águas potáveis, previamente cloradas.

Tabela 3.10 Principais subprodutos decorrentes da cloração da água

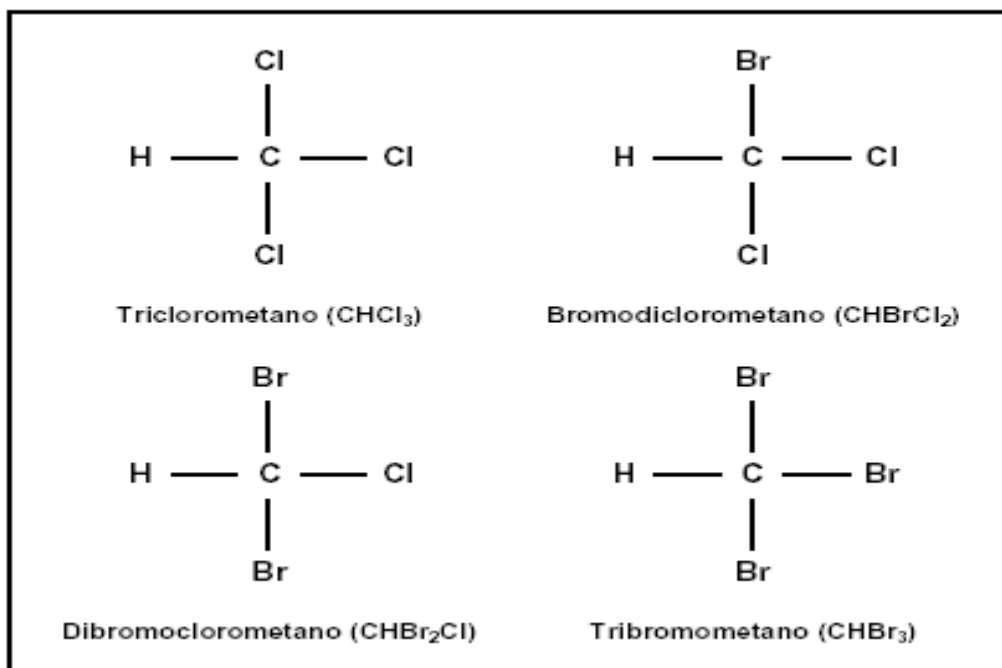
TRIALOMETANOS	Clorofórmio Bromodiclorometano Dibromoclorometano Bromofórmio
HALETOS DE CIANOGENÍOS	Cloreto de cianogênio Brometo de cianogênio
HALOPICRINAS	Cloropicrina Bromopicrina
HIDRATOS DE CLORAL	MX-[3-cloro-4(diclorometil)-5-hidróxi-2(5H)-Furanona
ÁCIDOS HALOACÉTICOS	Ácido monocloroacético Ácido dicloroacético Ácido tricloroacético Ácido monobromoacético Ácido dibromoacético Ácido bromocloroacético
HALOACETONITRILAS	Dicloroacetona Tricloroacetona Dibromoacetona Tribromoacetona Bromocloroacetona
HALOCETONAS, HALOALDEÍDOS, HALOFENÓIS	

Fonte: Tominaga Y.M et. al. modificado (2003)

Silva (2008), cita que destes compostos relacionados, os que possuem concentração mais significativa em água potável são: triclorometano, bromodiclorometano, dibromoclorometano e tribromometano, assim quando é feita referência aos TAMs, estão sendo mencionados os quatro compostos citados. O clorofórmio ou triclorometano é o TAM mais facilmente detectável

Na Figura 3.2 são mostradas as estruturas moleculares dos principais TAMs que podem ser encontrados em águas de abastecimento.

Figura 3.2: Estrutura molecular dos Trialometanos mais frequentes, que podem ocorrer em águas de abastecimento público



Fonte: Adaptado de KRASNER (1989).

Durante as décadas de 70 a 90, estudos realizados concluíram que a formação de TAM ocorre durante a desinfecção da água bruta com cloro devido a reações entre o cloro residual livre e compostos orgânicos, denominados precursores dos TAM, que tem

sua origem na decomposição da matéria orgânica presente na água ou do metabolismo da biota aquática. (SOARES e MAIA, 1999; TOMINAGA e MIDIO, 1999).

Os precursores nos mananciais são originados de diversas fontes, como descargas municipais e industriais, decomposição de matéria orgânica, escoamento de resíduos agrícolas, podendo ser classificados quanto à sua origem como (SOARES e MAIA, 1999):

- Naturais: Geralmente ácidos húmicos e fúlvicos formados pela decomposição da matéria orgânica;
- Sintéticos: substâncias químicas formadas durante o tratamento de água (ex. TAM) ou fontes específicas (ex. poluição industrial ou agrícola).

Macedo (2003) observou que a probabilidade de formação de TAMs é muito pequena ou nula quando utilizado ácido tricloroisocianúrico na cloração. Em relação ao ácido cianúrico resultante da hidrólise do ácido tricloroisocianúrico, que é largamente empregado como estabilizante do cloro principalmente no tratamento de piscinas, não tendo sido encontrados relatos de efeitos prejudiciais provocados pelo mesmo.

Piveli (2003) aponta que apesar das elevadas concentrações de matéria orgânica presente nos esgotos e efluentes tratados, os compostos precursores da formação de TAMs não são presentes em quantidades significativas.

3.13.1 Definição de Trialometano

Os Trialometanos (TAM) são membros de um grupo de compostos químicos orgânicos que contêm um átomo de hidrogênio, um átomo de carbono e três átomos de halogênios. Dos dez possíveis compostos formados pela combinação dos cinco átomos referidos, apenas quatro ocorrem de modo significativo, sendo mais comum o trialometano (JORDÃO E PESSOA, 2011). A Tabela 3.11 apresenta quais são as possíveis combinações para a formação dos TAMs.

Tabela 3.11 Fórmulas dos trialometanos

Fórmula Química	Denominações
CHCl_3	Triclorometano, Clorofórmio
CHBrCl_2	Bromodiclorometano
CHBr_2Cl	Dibromoclorometano
CHBr_3	Tribromometano, Bromofórmio
CHCl_2I	Dicloroiodometano
CHClBrI	Bromocloroiodometano
CHClI_2	Clorodiiodometano
CHBr_2I	Dibromoiodometano
CHBrI_2	Bromodiiodometano
CHI_3	Triiodometano, Iodofórmio

Fonte: Adaptado de SYMONS (1981)

3.13.2 Trialometano - Histórico

A partir da década de 70, quando o uso do cloro nas estações de tratamento de água e esgoto já se encontrava difundido, começaram os estudos sobre compostos organohalogenados, sendo descoberto que o clorofórmio e outros trialometanos eram produzidos durante a cloração da água. Mesmo não possuindo conhecimentos específicos sobre o assunto, os primeiros estudos demonstraram que os compostos cancerígenos mais encontrados eram os trialometanos. (GALLARD e GUNTEN, 2002).

Segundo Tominaga (1999) apud Tonon (2007), esta informação revestiu-se de grande importância em virtude da conclusão de um bioensaio sobre a carcinogenicidade do clorofórmio realizado pelo "*National Câncer Institute*". O resultado positivo para esse bioensaio levou, rapidamente, ao estudo de um valor limite de concentração máxima aceitável para esses compostos e, em 1979 a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency - EPA) aconselhou que o limite máximo para os trihalometanos totais (clorofórmio + bromodiclorometano + dibromoclorometano + bromofórmio) deveria ser de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ na água para consumo humano, sendo reduzido no ano de 1989 para $0,08 \text{ mg L}^{-1}$.

A Environmental Protection Agency (EPA) publicou em 1977 um relatório com o resultado de uma pesquisa efetuada em 113 sistemas de abastecimento, procurando detectar a concentração de 27 compostos orgânicos suspeitos de causar problemas a saúde da população. Dentre estes, 27 compostos verificaram a presença de quatro tipos de trihalometanos, os quais foram detectados em todas as águas que recebiam cloro como desinfetante e em concentrações superiores aos demais contaminantes organo-sintéticos (SILVA, 2008).

3.13.3 Reações de Formação dos Trialometanos

Segundo Silva (2008) a reação de formação dos Trialometanos é iniciada quando ocorre o contato entre o cloro e precursores e pode continuar ocorrendo por muito tempo, enquanto existir reagente disponível (principalmente cloro). Os ácidos fúlvicos e húmicos são considerados precursores na formação de Trialometanos.

A reação genérica para a formação de trialometanos é apresentada na equação 3.15 (SYMONS, 1981):



A reação 3.15 é favorecida pelo aumento da temperatura, pH alcalino, aumento da concentração de cloro residual livre, quantidade de precursores e tempo de reação. SOARES e MAIA, 1999).

De acordo com Meyer (1994) as variáveis que influenciam a reação de formação dos TAM são:

1. Tempo

Em relação ao tempo, a formação de Trihalometanos em condições naturais não é instantânea. Em princípio, quanto maior o tempo de contato entre o cloro e os precursores, maior será a probabilidade de formação dos TAM.

2. Temperatura

O aumento da temperatura significa um aumento na probabilidade de formação dos TAM.

3. pH

A formação dos TAM aumenta com a elevação do pH, pela sua ação catalítica sobre o halofórmio.

4. Concentração de brometo e iodeto

Os brometos e iodetos na presença de cloro aquoso são oxidados a espécies capazes de participar da reação de substituição orgânica, resultando na formação de TAM. O bromo tem vantagens sobre o cloro nas reações de substituição com os compostos orgânicos, mesmo que o cloro esteja presente em excesso quando comparado com o bromo inicial.

5. Características e concentrações dos precursores

Quanto maior a concentração de ácidos húmicos e fúlvicos, maior será a formação de TAM. As características da água e dos precursores presentes também irão influenciar a formação de TAM.

6. Concentração de cloro

Quanto maior a dosagem de cloro, maior será a probabilidade de formação de TAM. A forma sob a qual o cloro se apresenta também é importante. O cloro livre tem maior poder de formação de TAM do que o cloro combinado.

3.13.4 Níveis permissíveis de trialometanos

No Brasil somente quando foi promulgada a Portaria 36/90 aprovada pelo Ministério da Saúde, é que se determinou o valor máximo permissível de 100 µg/l para concentração de TAM totais. Esse valor continua a ser utilizado como parâmetro da portaria N°2914 de 12 de dezembro de 2011.

Tonon (2007) relata que quando a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA fixou o limite permissível de 0,08 mg/L de TAM na água para consumo humano, agiu dentro de uma filosofia que levou em conta a possibilidade potencial da substância estar ocasionando danos à saúde das pessoas submetidas a uma exposição crônica por toda uma vida gerada pela ingestão de clorofórmio, mesmo à baixa concentração. Outros países criaram a sua própria legislação para controlar a concentração permissível de TAM em águas de abastecimento como, por exemplo: Canadá 350 µg/L, Alemanha 25 µg/L, Holanda 75 µg/L e França 10 µg/L. Porém, a controvérsia que cerca a formação dos Trialometanos é cientificamente complexa, sendo muito difícil de determinar quais as concentrações consideradas seguras (MEYER, 1994).

3.14. Aspectos relativos à operação e à manutenção de sistemas utilizando cloração como método de desinfecção

De acordo com Gonçalves (2003) os compostos de cloro utilizados na desinfecção apresentam certas propriedades que devem ser consideradas no projeto, como forma de proteger os operadores das estações de tratamento de esgotos dos possíveis riscos que podem surgir durante a operação.

Em unidades de desinfecção que utilizam cloro gasoso, as principais preocupações com segurança e saúde ocupacional são relacionadas à possibilidade de vazamentos de cloro a partir dos cilindros, válvulas ou tubulações. A concentração limite que o operador pode ficar exposto ao cloro é de 1 ppm, em volume, tomada como média ponderada de um período de 8 horas. Outras concentrações de interesse para o cloro, no ambiente, são apresentadas na Tabela 3.12 é interessante notar que o nível mínimo de odor detectado pelo ser humano (3,5 ppm) é maior que o limite máximo estabelecido para a segurança do operador (1 ppm). Dessa forma, a unidade de desinfecção deve dispor de algum dispositivo, químico ou eletrônico, para o monitoramento contínuo de cloro no ambiente (GONÇALVES, 2003).

Tabela 3.12 Concentrações de cloro na fase gasosa e seus efeitos

Concentração (ppm v/v)	Resposta
3,5	Percepção mínima de odor
4,0	Efeito adverso sem gravidade
15,1	Irritação da garganta
30,2	Tosse
40 a 60	Nível de perigo

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2003) citando Chernicharo et al (2001) e Usepa (1986)

Caso ocorra algum contato com o cloro, seja por inalação, olhos ou pele, decorrente de vazamentos, podem ser tomadas algumas medidas de emergência indicadas na tabela 3.13 antes de consultar um médico.

Tabela 3.13 Procedimentos de emergência a serem tomados em decorrência de contato com o cloro

Tipo de contato	Procedimento
Geral	Retirar a pessoa do local e levá-la para uma área não contaminada. Remover a roupa contaminada e lavar, com água, todas as partes do corpo expostas ao cloro.
Inalação	Se a respiração estiver interrompida, proceder à respiração artificial. Quando a respiração for retomada, ou se a respiração não tiver sido interrompida, administrar oxigênio. Mantenha a pessoa aquecida e em repouso.
Contato com os olhos	Os olhos devem ser lavados com água durante 15 minutos, segurando as pálpebras abertas para garantir a completa irrigação dos mesmos
Contato com a pele	Lavar as partes que foram expostas ao cloro com água e sabão. É recomendável que a instalação disponha de uma ducha de emergência.

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2003) Chernicharo et al (2001) e Usepa (1986)

Em relação às questões de manutenção, um programa detalhado deve ser implementado na estação, segundo as frequências de inspeção recomendadas pelos fabricantes dos equipamentos, com o intuito de garantir a segurança da estação e a eficiência do processo de desinfecção. A manutenção de documentação completa e atualizada das tarefas e das análises efetuadas é de fundamental importância para garantir que as tarefas, as frequências e os procedimentos sejam registrados, possibilitando verificar as tendências históricas e as comparações entre distintos períodos de operação (GONÇALVES, 2003).

3.15. Custos para implantação da cloração

Segundo Silva (2008) a adoção de um sistema de desinfecção deve compreender um estudo do risco-benefício, no qual o tipo de tratamento, a tecnologia

aplicada, o desinfetante utilizado e o nível de remoção a ser atingido devem ser os principais pontos a serem observados.

Tonon (2007) cita que apesar da metodologia de desinfecção que deva prevalecer seja aquela que possa ocorrer de forma fácil, com riscos mínimos para a saúde e segurança, com facilidade de aplicação, medição e controle e com equipamentos de operação fácil e confiável, o custo é um fator determinante na escolha do sistema de desinfecção, pois custos elevados inviabilizam a sua implantação. A Tabela 3.14 apresenta custos de capital e de operação de diversos sistemas de desinfecção.

Tabela 3.14 Custos de capital e de operação de diversos sistemas de desinfecção.

Processo	Tamanho da Planta ($m^3 10^3 \text{ dia}$)*					
	3,79	37,85	378,54	3,79	37,85	378,54
	Custo de Capital (US\$ x 1000)			Custo de Desinfecção (centavos/ m^3)		
Cloro	60	190	840	0,92	0,38	0,18
Cloração/descloração***	70	220	930	1,15	0,46	0,24
Cloro/Carvão ativado	640	2800	8400	5,02	2,27	0,87
Ozônio (ar) **	190	1070	6880	1,93	1,06	0,75
Ozônio (O_2)	160	700	4210	1,89	0,92	0,62
Ultravioleta **	70	360	1780	1,11	0,71	0,60

*Unidades originais MGD. **Tratamento terciário não incluído nestes custos

***Sistema que utiliza o SO_2 como desclorante

Fonte: adaptado de White (1999).

Observa-se que o método de desinfecção que utiliza cloração e cloração/descloração são os que apresentam menor custo de implantação e custo da desinfecção por m^3 . A Tabela 3.15 apresenta o custo operacional e de implantação, sem descloração, para vários processos de desinfecção obtidos em algumas pesquisas da rede PROSAB no Brasil.

Tabela 3.15 Custos de implantação e de operação para processos de desinfecção.

Desinfecção	População hab.	Vazão L.s ⁻¹	Custo de implantação R\$	Custo unit. de impl. R\$/hab.	Custo de operação R\$/m ³
Cloro gasoso ⁽¹⁾	71.000	137	270.000,00	3,80	0,012
Cloro gasoso ⁽²⁾	124.000	310	600.000,00	4,83	0,024
Hipoclorito de sódio ⁽³⁾	41.380	88	230.000,00	5,55	0,078
Hipoclorito de sódio ⁽⁴⁾	14.425	40	210.000,00	14,56	0,089
Dióxido de cloro ⁽⁵⁾	5.844	10	273.674,00	46,83	0,108
Radiação UV ⁽⁶⁾	5.844	10	128.433,00	21,98	0,034
Ozônio ⁽⁷⁾	10.000	18,5	181.120,00	18,11	0,091

(1)Após UASB + FB; (2) Após UASB + FB ; (3) Após UASB + F An; (4)Após UASB + lagoa; (5) Após UASB + FAD; (6) Após UASB + FB

Fonte: Gonçalves (2003).

Como pode ser observado, em relação ao custo, não existe nenhuma dúvida de que os processos que utilizam o cloro gasoso destacam-se como opção mais viável. Porém, outros fatores devem ser considerados para escolha do processo como viabilidade operacional, qualidade do esgoto, formação de subprodutos, possibilidade de reuso do esgoto. Desse modo a utilização de desinfectantes alternativos, como ozônio, radiação ultravioleta tem se destacado como métodos promissores na desinfecção de esgotos sanitários, porém ainda precisam de uma redução no seu custo de implantação e operação.

4 MATERIAL E MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida nas áreas do laboratório de controle sanitário da SABESP de Franca e na Estação de Tratamento de Esgoto do município de Itirapuã, administrada pela Concessionária SABESP.

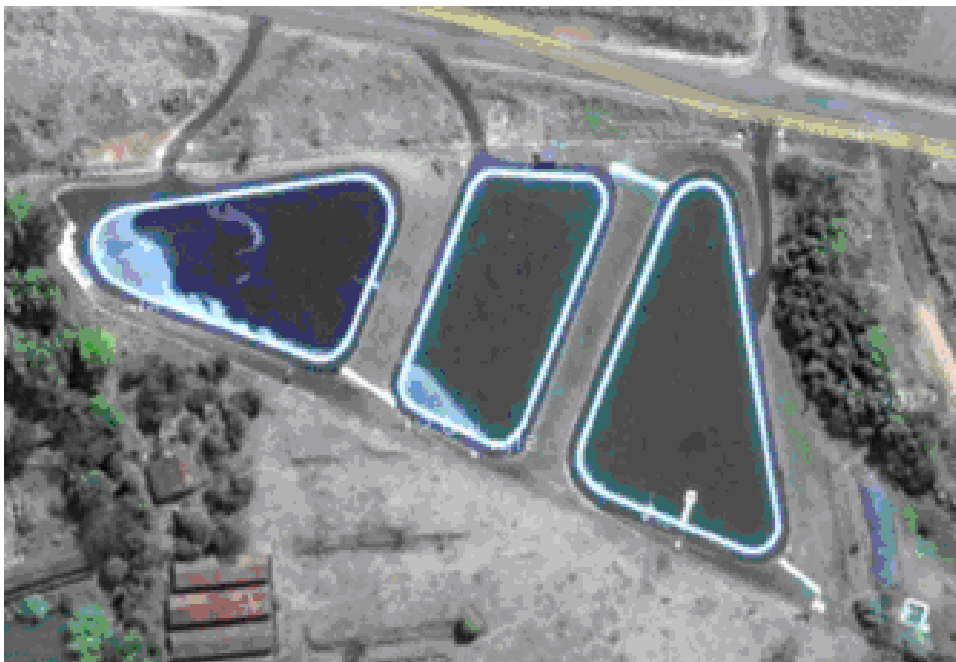
Os efluentes utilizados como objetos de pesquisa são oriundos do sistema de tratamento de esgoto do município de Itirapuã localizado na região nordeste do estado de São Paulo, pertencente à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 08, na Bacia Hidrográfica do Sapucaí Mirim/Grande.

Na escolha da Estação de Tratamento de Esgoto do município de Itirapuã foram consideradas principalmente as seguintes proposições:

- Recebimento essencialmente de esgoto doméstico;
- A necessidade de proximidade do laboratório de controle sanitário da SABESP de Franca, por razões logísticas, ao ser considerado o período despendido entre a captação, transporte e, início e finalização dos ensaios, preparo das amostras e análises.

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Itirapuã é um sistema de lagoa facultativa com capacidade nominal de 13,3 l/s (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITIRAPUÃ). A Figura 4.1 ilustra a ETE de Itirapuã.

Figura 4.1 Imagem aérea da ETE de Itirapuã



Fonte: GOOGLE (2013)

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas distintas, constituídas por:

1ª Etapa: Desempenho do clorador;

2ª Etapa: Ensaio Experimental para determinação da dosagem de cloro;

3ª Etapa: Implantação do clorador na lagoa de estabilização

4.1. Desempenho do clorador

Inicialmente foi realizado um estudo para conhecimento da capacidade de dosagem do clorador, com a utilização de água tratada para dissolução das pastilhas, variando vazão e tamanho da área molhada de ATCI. Foram realizados ensaios de cloro residual total na solução clorada para determinação da concentração de cloro.

4.1.1 Descrição e funcionamento do clorador

O clorador utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido na Sabesp de Franca, baseado em modelos existentes no mercado. Sua estrutura principal conforme ilustra a Figura 4.2, foi confeccionada em fibra de vidro e o PVC utilizado nas demais partes, para evitar corrosão do sistema (GONÇALVES, 2003). O clorador de pastilhas é um dispositivo que promove a dissolução das pastilhas cloradas pela passagem de água ou esgoto, formando a solução clorada que é utilizada na desinfecção.

Figura 4.2 Clorador de pastilhas de ATCI instalado na ETA Franca



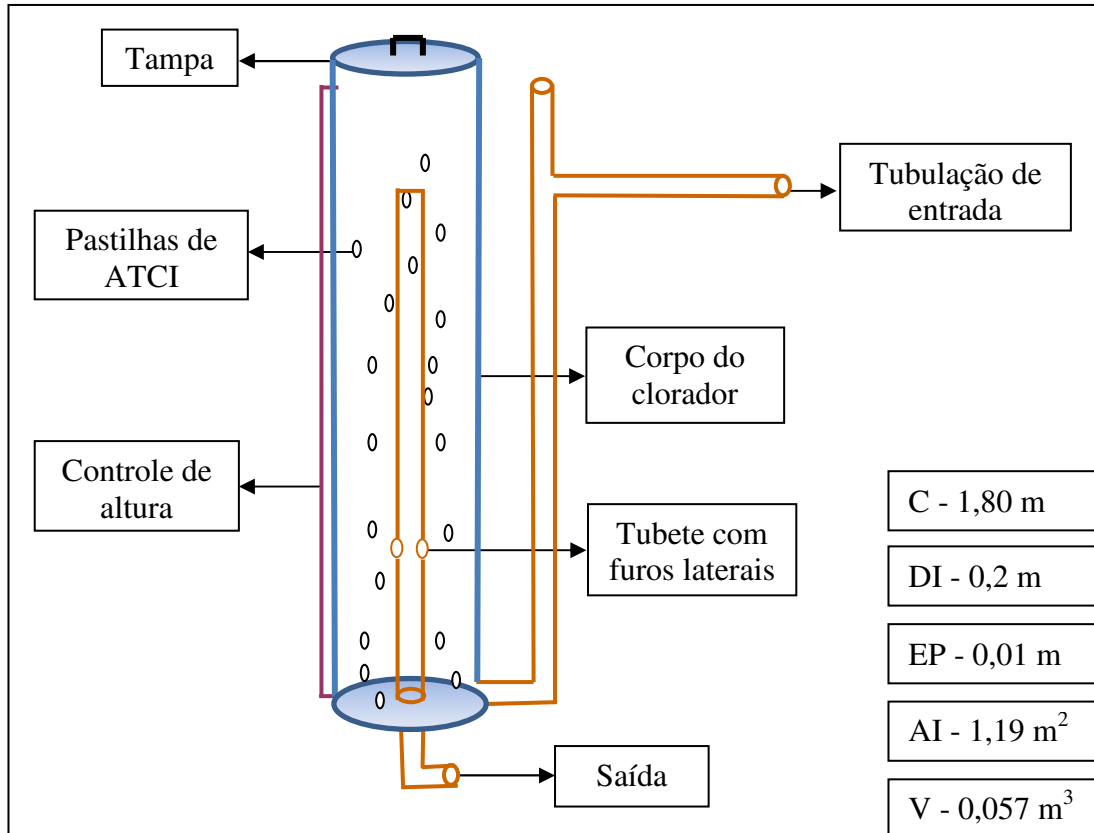
Fonte: Autor (2013)

O funcionamento do sistema de cloração inicia-se com a chegada da água ou esgoto pela tubulação de entrada, de onde se encaminha ao clorador pela parte inferior, passa pelas pastilhas cloradas e forma a solução clorada. A solução clorada é drenada pelos furos laterais do tubete e encaminhada para a saída do clorador, de onde se mistura com o líquido a ser desinfectado.

Há duas maneiras de se alterar a dosagem de cloro no sistema, uma através da vazão de entrada, feita aumentando ou diminuindo a vazão; e outra pelo tamanho da área molhada, obtida alterando-se a altura dos furos laterais do tubete. O tamanho desta área determina a quantidade de pastilhas cloradas expostas à dissolução, e conseqüentemente, quanto de cloro é liberado pelo sistema. Assim, quanto mais alto estiverem os furos laterais no tubete, maior a extensão da área molhada e maior a dosagem de cloro.

A Figura 4.3 é uma representação esquemática do clorador com a identificação dos componentes.

Figura 4.3 - Ilustração do clorador de pastilhas com identificação dos componentes



C - comprimento, DI - diâmetro interno, EP - espessura da parede, AI - área interna e V - volume

4.1.2 Montagem e avaliação da capacidade de dosagem do clorador

O clorador foi montado nas dependências da Sabesp de Franca, junto à estação de tratamento de água (ETA). Foi instalada uma caixa de PVC com capacidade para 500 litros, antes do clorador, abastecida por uma linha de água pressurizada da ETA, conforme ilustrado na Figura 4.4. O fluxo de água na caixa dá-se da parte inferior para a superior, de onde é vertida para o clorador.

Figura 4.4 – Clorador de pastilhas de ATCI instalado na ETA Franca



Fonte: Autor (2013)

A capacidade de dosagem do clorador foi avaliada em quatro alturas de furos do tubete, cada uma delas combinada com três vazões, totalizando doze testes, nos quais o cloro residual total da solução clorada foi analisado, além da vazão. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos testes realizados.

Tabela 4.1 Teste de capacidade de dosagem do clorador de pastilhas

Altura (H) dos furos no tubete (cm)	Superfície molhada		Redutor (polegadas)
	Área (m ²)	Volume (m ³)	
5	0,12	0,003	1/2
			3/4
			1
10	0,18	0,006	1/2
			3/4
			1
20	0,24	0,009	1/2
			3/4
			1
30	0,30	0,012	1/2
			3/4
			1

As variações de vazão foram obtidas utilizando-se três tamanhos de redutores adaptados na tubulação de entrada do sistema, um para cada teste, conforme ilustra Tabela 4.1. Cada um dos doze testes consumiu aproximadamente 12kg de pastilhas de ATCI no tempo médio de 5 dias, sem reposição, onde várias medidas diárias de cloro e vazão foram realizadas para compor um valor médio.

O sistema tem capacidade para 44 kg de pastilhas, dando uma densidade aparente de 0,8 kg/l.

4.1.3 Cálculo do tamanho da área molhada

O tamanho da área molhada com pastilhas de ATCI determina quanto de cloro será liberado pelo sistema. Quanto maior a área molhada, maior a capacidade de cloração. Para estimar o tamanho da área molhada foram utilizadas as fórmulas de área e volume do cilindro.

Fórmula para área (A) em (m²)

$$A = 2 \times \pi \times R(H + R), \text{ onde:} \quad (4.1)$$

R – raio (m)

H – altura (m)

π – 3,14

Fórmula para volume (V) em m³

$$V = \pi \times R^2 \times H \quad (4.2)$$

Para exemplificar, um cálculo foi feito com os dados referentes ao teste do sistema utilizando o tubete com furos a 30 cm de altura. Com uma régua mediu-se a altura (H) do líquido no interior do sistema através do controle de altura, conforme ilustrado na Figura 4.5. A altura medida foi 0,38 m e o raio (R) 0,1 m, uma vez que o diâmetro do sistema é de 0,20 m. Assim obteve-se:

Área

$$A = 2 \times 3,14 \times 0,1(0,38 + 0,1)$$

$$A = 0,30 \text{ m}^2$$

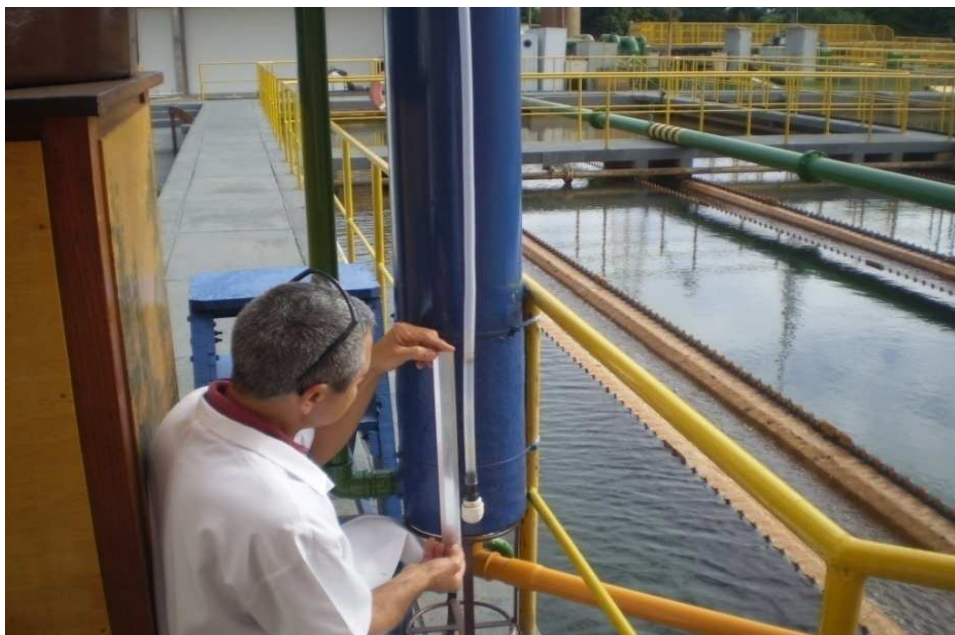
Volume

$$V = \pi \times R^2 \times H$$

$$V = 3,14 \times 0,1^2 \times 0,38$$

$$V = 0,012 \text{ m}^3$$

Figura 4.5- Imagem da medição da altura da área molhada realizada no sistema de cloração montado na ETA Franca



Fonte: Campos (2013)

4.1.4 Ensaios realizados durante a avaliação do desempenho do clorador

Foi medida a temperatura da água e vazão durante os experimentos. A vazão (m^3/h) foi determinada coletando com o auxílio de uma proveta o volume liberado pelo sistema de cloração em um tempo cronometrado.

Também foram determinadas as concentrações de cloro residual total, utilizando o método colorimétrico, com uso do reagente DPD, conforme preconizado pelo Standard Methods, 22^a edição (2012), método 4500-Cl G.

4.1.5 Caracterização do desinfetantes

O desinfetante utilizado nos experimentos foi o ácido tricloroisocianúrico fabricado pela empresa Beraca Sabará Químicos e Ingredientes S/A, cujo nome comercial é Cloroplast 9010, pertencente ao lote de fabricação número 11006425 e considerado eficaz para a potabilização da água destinada ao consumo humano,

conforme descrição contida no rótulo do produto. As pastilhas de ATCl são compostas de cloro orgânico, possui coloração branca e formato cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Pastilhas de ATCl



Fonte: Autor (2013)

As características do produto, conforme informações do fabricante encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Característica do ácido tricloroisocianúrico

Característica	Valor
Cloro ativo	Mínimo 90 %
Comprimento da pastilha	3 cm
Cor	Branca
Densidade (20 a 25°C)	> 0,74 g/cm ²
Diâmetro da pastilha	35 mm
Estado físico	Pastilha sólida compactada
Odor	Característico de cloro
Peso médio da pastilha	50 g
Peso molecular	232,5
pH a 1 %	2 a 4
Pureza	100 % p.p
Solubilidade	25 g/100 ml de água

Fonte: Adaptado de Beraca (2011)

Objetivando a comparação dos resultados nesta etapa do experimento, além do desinfetante ATCI, foi utilizado também o hipoclorito de sódio fornecido pela empresa Carbocloro, com a descrição das características apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Característica do hipoclorito de sódio

Característica	Valor
Aspecto	Límpido e levemente amarelado
Fórmula química	NaClO
Peso molecular	74,5
Ponto de fusão	-25 °C (Sol. a 12% NaClO)
Solubilidade em água	Completa
Peso específico	1,2 (Sol. a 12% NaClO)
Teor de hipoclorito de sódio	Mínimo 12 % m/m

Fonte: Adaptado de Carbocloro (2012)

4.2. Etapa 2 – Arranjo experimental para determinação da dosagem

Através da realização de testes piloto em laboratório, foi definida experimentalmente nesta segunda etapa a dose desinfetante para o efluente estudado, através de ensaios com hipoclorito de sódio e do ácido tricloroisocianúrico, com posterior comparação dos resultados.

Os testes para determinação da dosagem e o tempo de contato requeridos na dosagem, foram realizados utilizando um equipamento de ensaios em jarro (jar test). A realização destes testes ocorreu no laboratório pertencente à Divisão de Controle Sanitário da Sabesp de Franca.

Também foram determinadas as concentrações de cloro residual total, utilizando o método colorimétrico, com uso do reagente DPD, conforme preconizado

pelo Standard Methods, 22ª edição (2012), método 4500-Cl G. Nesta etapa optou-se pela determinação de cloro residual total, pois conforme preconizado no Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater (2012), a cloração de efluentes raramente é conduzida ao ponto de formar cloro residual livre, o que resultaria na adição de grandes quantidades de cloro até satisfazer toda demanda.

4.2.1 Ensaios de caracterização do efluente

Para caracterização do efluente foram realizados cinco testes entre os meses de janeiro e março de 2013 para estimar a dosagem do cloro. Em cada teste o efluente foi caracterizado nos parâmetros coliformes totais, condutividade, cor aparente, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), Escherichia coli, fósforo total, nitrato, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, pH, sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez.

As amostras foram ensaiadas no Laboratório de Controle Sanitário e Ambiental da Sabesp de Franca e no Laboratório de Análises Avançadas da Sabesp Ipiranga situada em São Paulo e as metodologias empregadas foram as recomendadas pelo Standard Methods 22ª edição (2012), sendo os dois laboratórios acreditados pelo Inmetro na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. Na tabela 4.4 seguem os parâmetros com as respectivas metodologias analíticas.

Tabela 4.4 – Metodologia utilizada para os ensaios

Parâmetro	Metodologia	Metodologia Standard Methods
Coliforme total	Substrato enzimático	SMEWW-9223 B
Condutividade	Eletrométrica	SMEWW-2510 B
Cor aparente	Colorimétrica	SMEWW-2120 E
DBO	Respirométrica	SMEWW-5210 D
DQO	Refluxo fechado colorimétrico	SMEWW-5220 D
Escherichia coli	Substrato enzimático	SMEWW-9223 B
Fósforo total	Colorimétrica	SMEWW-4500-P B, E
Nitrato	Eletrométrica	SMEWW-4500-NO3-D
Nitrogênio amoniacal	Eletrométrica	SMEWW-4500-NH3 D
Oxigênio dissolvido	Eletrométrica	SMEWW-4500 OG
pH	Eletrométrica	SMEWW-4500 H+B
Sólidos suspensos totais	Gravimétrica	SMEWW-2540 B
Sólidos totais	Gravimétrica	SMEWW-2540 D
Turbidez	Nefelométrica	SMEWW-2130 B
Bromodiclorometano	Cromatografia	SMEWW-6200 B
Bromofórmio	Cromatografia	SMEWW-6200 B
Clorofórmio	Cromatografia	SMEWW-6200 B
Dibromoclorometano	Cromatografia	SMEWW-6200 B
Trihalometanos	Cromatografia	SMEWW-6200 B

Fonte: Adaptado de Standard Methods 22ª edição (2011)

4.2.2 Descrição do ensaio experimental – dosagem e tempo de contato

As amostras do efluente da lagoa facultativa de Itirapuã foram coletadas individualmente para cada teste, em datas distintas, e submetidas a concentrações de cloro residual total de 2,5 mg/l, 3,5 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l, 15 mg/l e 20 mg/l. Cada uma das concentrações foi avaliada nos tempos de contato de 5 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos e 60 minutos para verificar a eficiência em termos de remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*, esperada ser superior a 4 unidades logarítmicas, ou seja, maior que 99,99 %, o que proporcionaria uma redução considerável no impacto causado no corpo receptor. A escolha das concentrações de cloro baseou-se em

informação da literatura que preconiza concentrações de cloro de 6 a 13 mg/l para desinfecção de efluente de lagoa de estabilização (CORAUCCI ET.AL., 2003).

Para cada teste foram coletados 40 litros de amostra. Deste volume, foram retiradas alíquotas para caracterização do efluente, além de encher as cubas de jar test, contendo dois litros cada uma, para realização simultânea do ensaio com hipoclorito e ATCI; sendo 6 concentrações do hipoclorito, 6 do ATCI e um branco, cuja função foi avaliar a variação da concentração dos coliformes e *Escherichia coli* no tempo do teste. Para isto, três instrumentos de jar test foram utilizados na rotação de 50 rpm. A Figura 4.7 ilustra o teste.

Figura 4.7 – Teste de cloração no efluente da lagoa facultativa da ETE de Itirapuã



Fonte: Autor (2013)

Duas soluções cloradas foram preparadas, uma com hipoclorito de sódio e outra com ATCI. Ambas tiveram a concentração de cloro residual total determinada

antes de se iniciar as dosagens no efluente. Utilizou-se a fórmula 4.3 para cálculo das alíquotas de solução clorada a ser adicionada no efluente para obter as concentrações desejadas.

$$C_1V_1 = C_2V_2, \text{ onde:} \quad (4.3)$$

C_1 – concentração de CRT da solução clorada, em mg/l

V_1 – alíquota da solução clorada, em ml

C_2 – concentração final de CRT no efluente, em mg/l

V_2 – volume de efluente, em ml

Como exemplo, considerou-se que a concentração de cloro nas soluções foi de 1000 mg/L. Assim, os volumes aplicados de cada solução clorada obedeceram ao descrito na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dosagem de cloro aplicada nas amostras do efluente da lagoa facultativa de Itirapuã

Solução clorada	Alíquota aplicada da solução clorada (mL)	Cloro residual total aplicado em 2000 mL de efluente (mg/L)
Hipoclorito de sódio - 1000 mg/L de cloro residual total	10	5
	20	10
	30	15
	40	20
ATCI – 1000 mg/L de cloro residual total	10	5
	20	10
	30	15
	40	20

Imediatamente após a adição das alíquotas da solução clorada no efluente, o cronômetro foi acionado. Nos tempos de 5 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos e 60 minutos, amostras de cada concentração foram coletadas e analisadas para determinação de coliformes totais e *Escherichia coli*. Também foram analisados os parâmetros de pH e temperatura para todas as concentrações, no tempo de 60 minutos.

A dose aplicada de cloro no efluente da lagoa facultativa de Itirapuã pode ser entendida como o fator CT, que é definido como o produto da concentração (mg/l) pelo tempo de contato (minutos). Na Tabela 4.6 encontra-se uma súmula do teste com as dosagens e o fator CT, calculado em função dos tempos de contato e das concentrações de cloro aplicadas.

Tabela 4.6 Súmula do teste com hipoclorito de sódio e ácido tricloroisocianúrico

Concentração (mg/l)	Volume (ml)	Tempo de contato (min.)	Fator CT (mg/l)	Número de testes/desinfetante
2,5	2000	5	12,5	5
		15	37,5	5
		30	75	5
		45	112,5	5
		60	150	5
3,5	2000	5	17,5	5
		15	52,5	5
		30	105	5
		45	157,5	5
		60	210	5
5	2000	5	25	5
		15	75	5
		30	150	5
		45	225	5
		60	300	5
10	2000	5	50	5
		15	150	5
		30	300	5
		45	450	5
		60	600	5
15	2000	5	75	5
		15	225	5
		30	450	5
		45	675	5
		60	900	5
20	2000	5	100	5
		15	300	5
		30	600	5
		45	900	5
		60	1200	5
Branco	2000	30	-	5

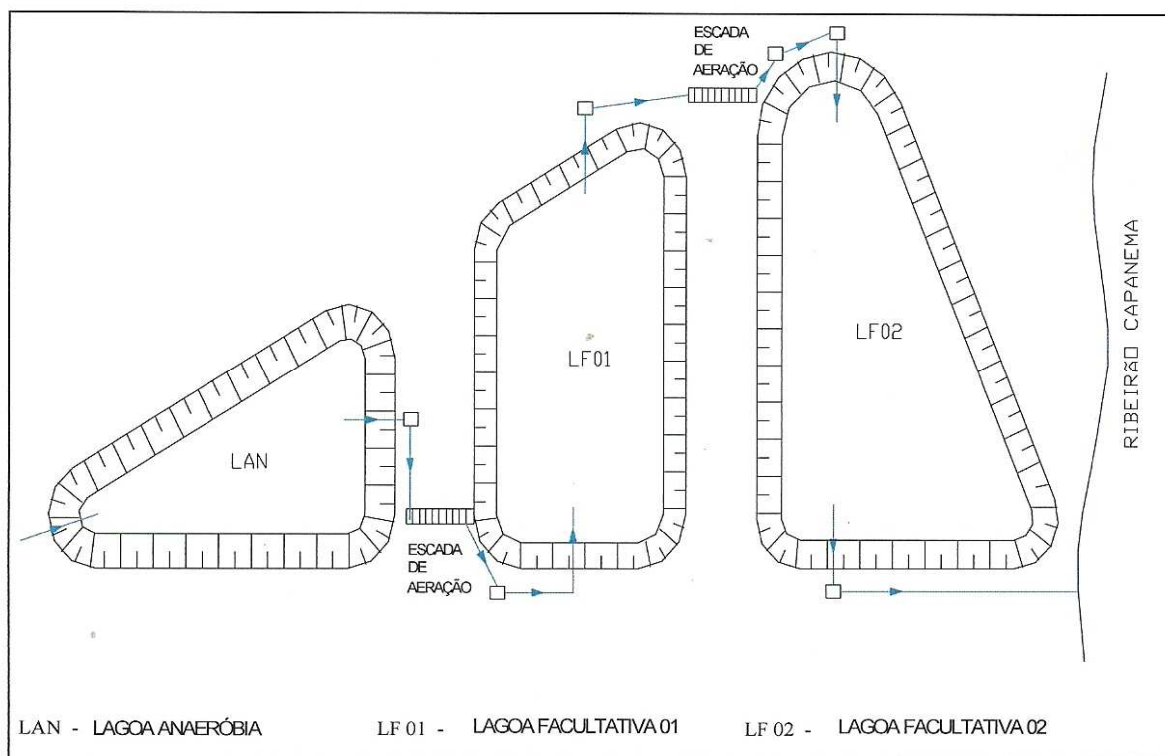
4.3. Implantação do sistema de desinfecção na lagoa de estabilização

Com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores, o sistema de desinfecção foi montado na saída da lagoa de estabilização de Itirapuã e acompanhado durante três meses consecutivos. As análises relacionadas a esta etapa também foram realizadas pelo laboratório de controle sanitário da Sabesp de Franca.

4.3.1 Descrição da ETE

A Estação de Tratamento de Esgoto de Itirapuã é constituída por um sistema de lagoas de estabilização, composta por três lagoas em série, operando desde 1988. A eficiência média do sistema para remoção de carga orgânica é superior a 90 % e para *Escherichia coli* é de 90%, ou seja, remove uma unidade logarítmica. (Sabesp, 2012). O efluente tratado é lançado no Ribeirão Capanema, um rio classe 4. O esgoto flui pela ETE por gravidade, pois toda área encontra-se em desnível. O fluxograma da ETE está ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Fluxograma do sistema de tratamento de esgoto - ETE Itirapuã



A capacidade instalada de tratamento da ETE é de 13,3 l/s, mas opera na atualidade com uma vazão média diária de 9,8 l/s. O esgoto afluyente à ETE passa pelo tratamento preliminar, que conta com gradeamento e caixa de areia. Na sequência encaminham-se para as três lagoas de estabilização, sendo a primeira uma anaeróbia e a segunda e terceira, duas facultativas. O tempo de detenção total, de projeto, é de 12,5 dias. As características de cada uma destas lagoas estão detalhadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características das lagoas

	Lagoa anaeróbia	Lagoa facultativa 1	Lagoa facultativa 2
Superfície (m ²)	3000	2560	3160
Volume (m ³)	5580	3830	4960
Profundidade (m)	2,80	1,80	1,80
Tempo detenção (d)	4,9	3,3	4,3
Vazão de projeto (l/s)	13,3	13,3	13,3
Vazão atual (l/s)	9,8	9,8	9,8

Fonte: Adaptado do Plano de saneamento de Itirapuã (2011)

Depois da segunda lagoa facultativa, o efluente antes de ser lançado no Ribeirão Capanema passa por uma calha parshall e um tanque de contato, promovendo o contato entre o efluente e o cloro. O tanque possui volume de $28,73 \text{ m}^3$, dividido internamente por chicanas e projetado para um tempo de detenção de 30 minutos.

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 mostram a área da ETE de Itirapuã.

Figura 4.9 – Lagoa anaeróbia da ETE Itirapuã



Fonte: Campos (2013)

Figura 4. 10 – Lagoa facultativa 1 da ETE Itirapuã



Fonte: Campos (2013)

Figura 4.11 - Lagoa facultativa 2 da ETE Itirapuã



Fonte: Campos (2013)

Figura 4.12 - Tanque de contato da ETE Itirapuã



Fonte: Campos (2013)

4.3.2 Instalação do clorador

O clorador foi instalado na saída da segunda lagoa facultativa, logo após o vertedor, conforme ilustra a Figura 4.13. Foi adaptada uma tubulação de duas polegadas no vertedor que conduz parte do esgoto tratado ao clorador para fazer a dissolução das pastilhas cloradas, enquanto a maior parcela escoava normalmente, conforme Figura 4.14. O fluxo do esgoto para o clorador é controlado por meio de uma válvula instalada na tubulação de entrada.

Figura 4.13 – Clorador instalado na ETE de Itirapuã



Fonte: Campos (2013)

Figura 4. 14 – Detalhe do fluxo do esgoto no clorador



Fonte: Campos (2013)

O clorador foi montado considerando-se a vazão média da ETE de 4,42 l/s, medida na ETE através da calha Parshall. Baseado nos resultados obtidos na segunda etapa, idealizou-se aplicar 10 mg/l de cloro residual total no tempo de contato de 30 minutos, o que resulta num fator CT de 300 mg.min/l, considerado mais que suficiente para a desinfecção do efluente. Tal condição demanda aplicar uma carga de cloro de cerca de 44 mg/l, o que poderia ser obtido com uma vazão no clorador de 0,44 l/s e concentração de cloro residual total de 100 mg/l.

A altura do tubete a ser instalado no clorador para dosar 100 mg/l de cloro residual total foi calculada através da equação 5.1.

$$\text{CRL (mg/l)} = 2,773H + 7,441$$

A altura (H) calculada do tubete foi de aproximadamente 33 cm. Através da equação 5.5, referente ao teste do tubete com furos a 30 cm de altura, foi calculada a concentração de cloro que poderia ser aplicada adotando-se a vazão de 0,44 l/s, definida anteriormente.

$$\text{CRT (mg/l)} = - 54,29Q + 141,97$$

Nesta condição o cloro aplicado seria de aproximadamente 118 mg/l.

Com base nestes cálculos, foi instalado no clorador um tubete com furos a 30 cm de altura e a vazão ajustada para aproximadamente 0,44 l/s. Assim, os testes de desinfecção com o clorador foram iniciados e acompanhados de setembro de 2013 a janeiro de 2014.

4.3.3 Avaliação da eficiência do sistema de desinfecção

Nesta etapa, foram coletadas amostras do efluente desinfectado para ensaios de TAM, cloro residual total e coliformes totais e *Escherichia coli*. As amostras foram coletadas três vezes por semana na saída do tanque de contato utilizando-se frascos adequados para realização dos ensaios de TAM. Também foi monitorado no corpo receptor.

4.3.4 Caracterização do efluente da ETE

Durante a avaliação do funcionamento do sistema de desinfecção, três amostras do efluente da ETE, sem cloro, foram coletadas para caracterização. As amostras foram analisadas nos parâmetros de coliformes totais, condutividade, cor

aparente, cromo, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), *Escherichia coli*, fósforo total, nitrato, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, pH, sólidos suspensos totais, sólidos totais, turbidez e TAM. O objetivo foi verificar alterações na qualidade do efluente quando comparado com as amostras utilizadas nos testes pilotos, conforme descrito na etapa 2.

As metodologias de análise empregadas foram as descritas no item 4.2.1.

4.3.5 Avaliação do custo da desinfecção

A avaliação do custo da desinfecção utilizando ATCI foi realizada considerando as despesas de implantação e custo operacional. Na implantação, considerou os gastos com mão-de-obra e aquisição do clorador e no custo operacional, foi considerado o valor gasto com produto químico (ATCI) e também a mão-de-obra na operação e manutenção do sistema.

4.3.6 Tratamento estatístico dos resultados

Os resultados da primeira etapa foram tratados através de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados visando conhecer a correlação entre as variáveis cloro residual total, vazão e área molhada, além de se estabelecer as equações de dosagem de cloro. Na segunda etapa, como os resultados obtidos não seguem uma distribuição normal, foram tratados estatisticamente por um método não paramétrico, o teste de Kruskal-Wallis, utilizando-se o Software Action, versão 2.5, para comparação dos resultados obtidos nos tratamentos com NaClO e ATCI. Os resultados da terceira etapa foram avaliados graficamente utilizando-se a ferramenta Excel.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As atividades de cada etapa foram desenvolvidas separadamente, com início em junho de 2012 e término em janeiro de 2014, totalizando 19 meses de trabalho prático. Os resultados estão apresentados para cada uma das etapas desenvolvidas.

5.1. Etapa 1 - estudo da capacidade de dosagem do clorador

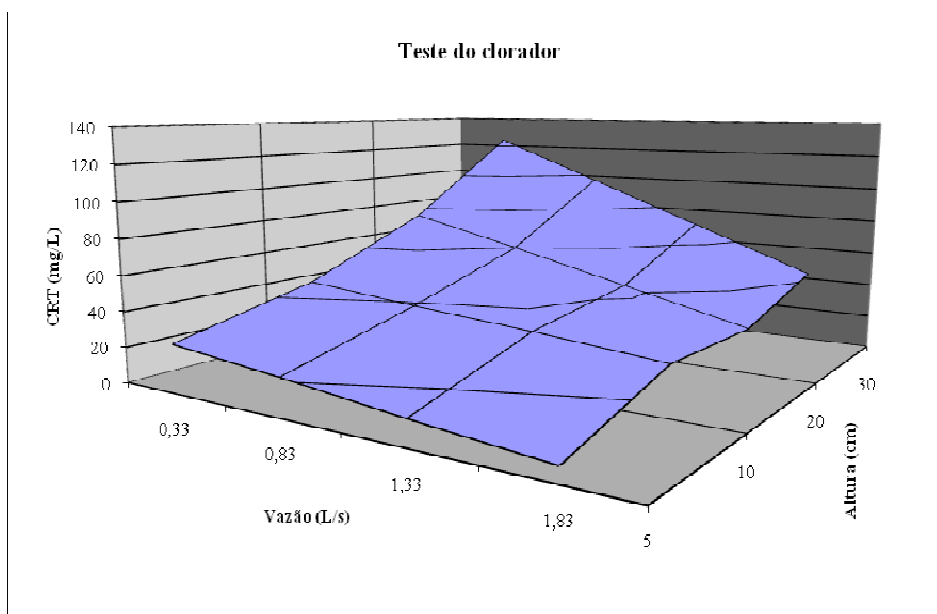
Esta etapa foi iniciada em junho de 2012 e encerrada em setembro de 2012. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Resultados dos testes para estudo da capacidade de dosagem do clorador

Altura (H) dos furos no tubete (cm)	Superfície molhada		Redutor (polegadas)	Média dos resultados	
	Área (m2)	Volume (m3)		Vazão (Q) (l/s)	CRL (mg/l)
5	0,12	0,003	1/2	0,4	27
			3/4	0,63	23
			1	1,23	16
10	0,18	0,006	1/2	0,42	44
			3/4	0,57	42
			1	1,47	32
20	0,24	0,009	1/2	0,42	74
			3/4	0,78	60
			1	1,2	48
30	0,30	0,012	1/2	0,47	118
			3/4	0,73	100
			1	1,23	76

A variação de cloro em função da altura dos furos do tubete e vazão é mostrada na Figura 5.1. Observa-se que a concentração de cloro liberada pelo sistema está diretamente associada ao tamanho da área molhada. Quanto maior a altura dos furos no tubete, maior a área molhada e mais cloro é dosado, pois um maior volume de pastilhas é submetido ao desgaste pela água.

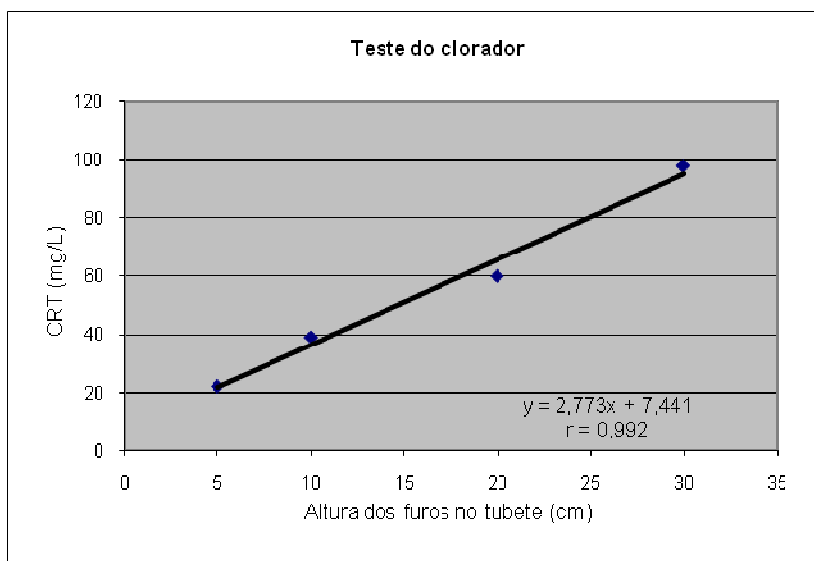
Figura 5.1 – Variação do cloro em função da altura dos furos do tubete e vazão



Como mostrado na Figura 5.1 a dosagem de cloro é inversamente proporcional vazão, diferente do ocorre com a área molhada. Observa-se que vazões maiores resultam em menores concentrações de cloro dosado. O fluxo lento no interior do sistema favorece o desgaste das pastilhas, liberando mais cloro. Apesar deste comportamento, a carga total de cloro dosada, produto da vazão e da concentração de cloro, ainda é superior nas vazões maiores.

A Figura 5.2 demonstra o teste do clorador nas diversas alturas de furos do tubete.

Figura 5.2 – Teste do clorador com diferentes alturas de furos no tubete

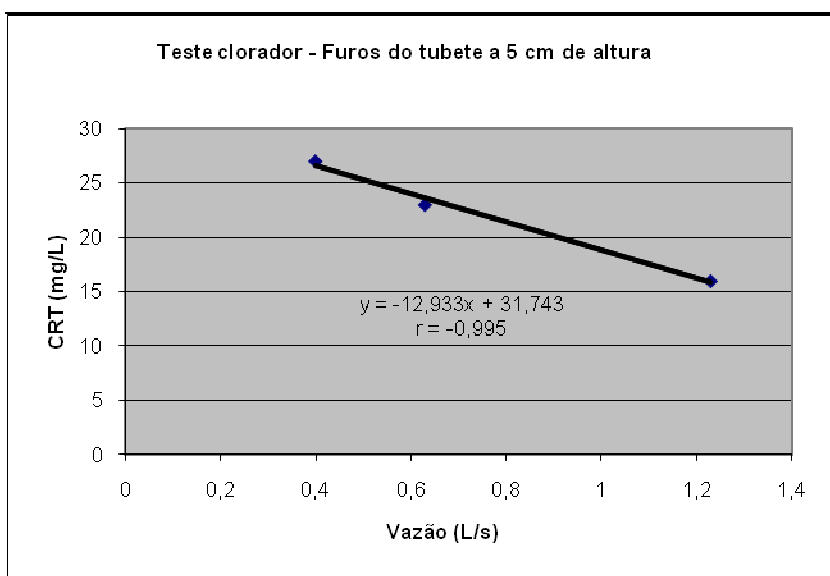


A equação 5.1 foi obtida pela regressão linear dos dados de cloro e altura dos furos no tubete, cujo coeficiente de correlação (r) foi de 0,992.

$$\text{CRT (mg/l)} = 2,773H + 7,441 \quad (5.1)$$

As Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 ilustram, respectivamente, os testes do clorador com tubetes perfurados à altura de 5 cm, 10 cm, 20 cm e 30 cm.

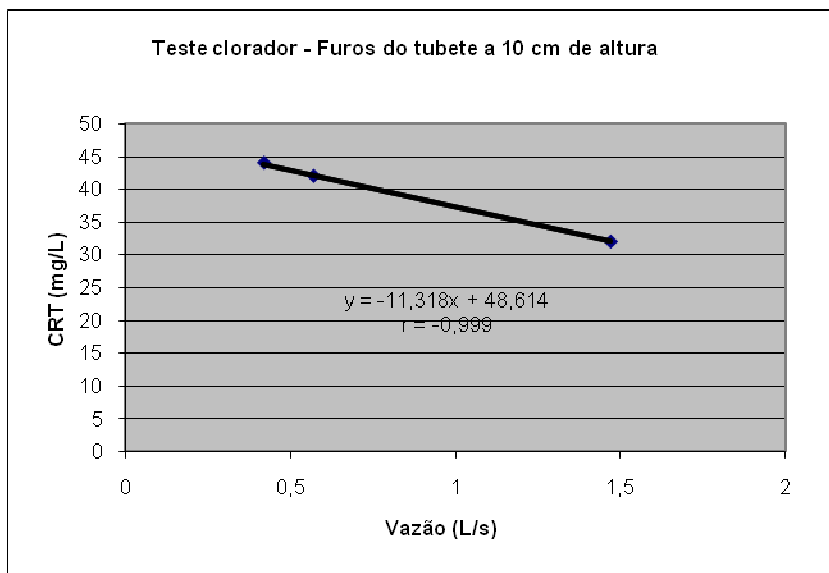
Figura 5.3 - Teste do clorador com tubete perfurado a 5 cm de altura



A equação 5.2 resulta da regressão linear dos dados de cloro e vazão do teste a 5 cm de altura e apresentou coeficiente de correlação (r) de -0,995.

$$\text{CRT (mg/l)} = - 12,933Q + 31,743 \quad (5.2)$$

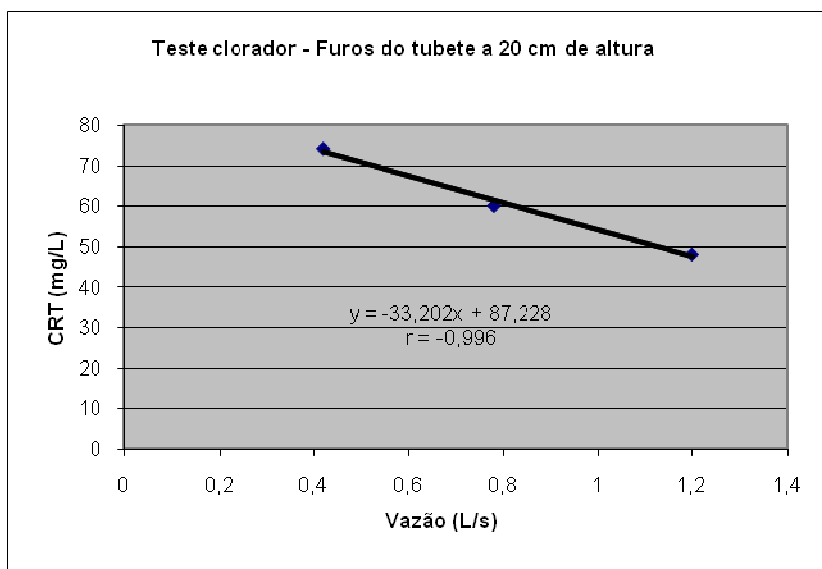
Figura 5.4 - Teste do clorador com tubete perfurado a 10 cm de altura



A equação 5.3 resulta da regressão linear dos dados de cloro e vazão do teste a 10 cm de altura e apresentou coeficiente de correlação (r) de -0,999.

$$\text{CRT (mg/l)} = - 11,318Q + 48,614 \quad (5.3)$$

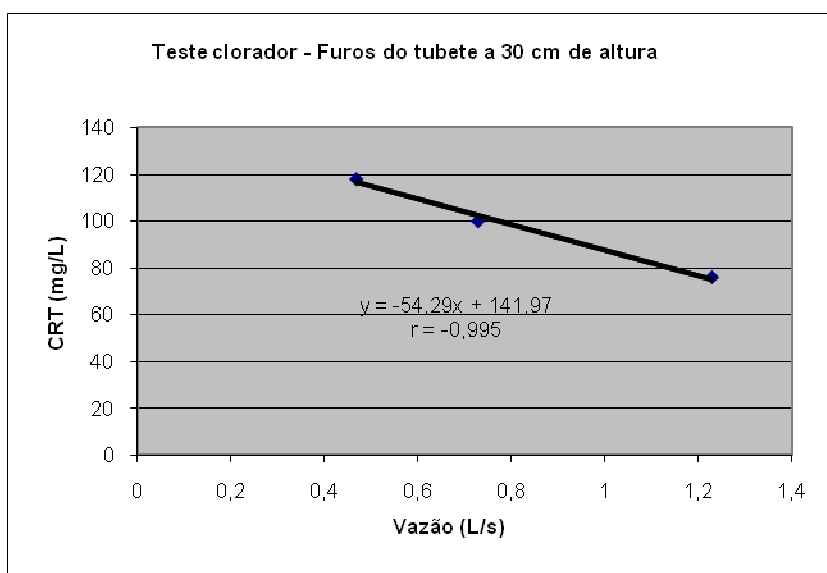
Figura 5.5 - Teste do clorador com tubete perfurado a 20 cm de altura



A equação 5.4 resulta da regressão linear dos dados de cloro e vazão do teste a 20 cm de altura que apresentou coeficiente de correlação (r) de -0,996.

$$\text{CRT (mg/l)} = - 33,202Q + 87,228 \quad (5.4)$$

Figura 5.6 - Teste do clorador com tubete perfurado a 30 cm de altura



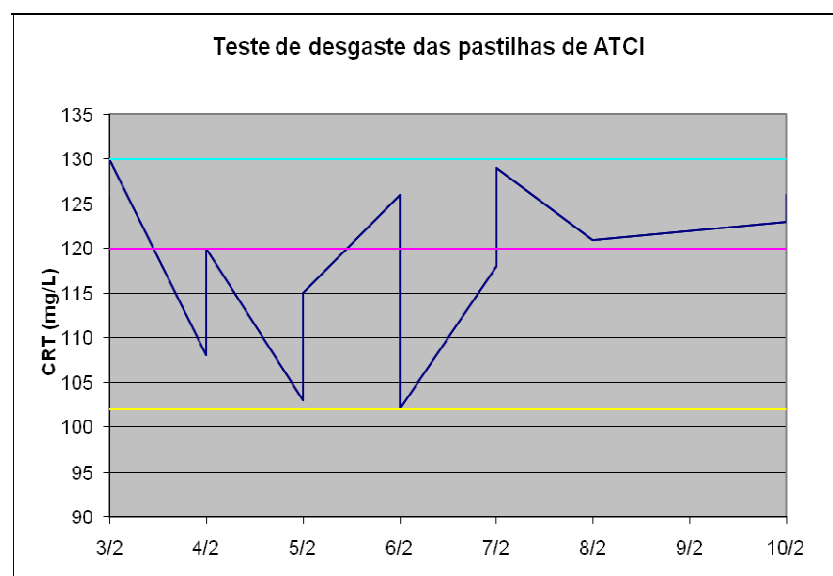
A equação 5.5 resulta da regressão linear dos dados de cloro e vazão do teste a 30 cm de altura que apresentou coeficiente de correlação (r) de -0,995.

$$\text{CRT (mg/l)} = - 54,29Q + 141,97 \quad (5.5)$$

Através das equações de 5.1 a 5.5 é possível configurar o clorador quanto à altura dos furos do tubete (área molhada) e a vazão para fornecer a dosagem de cloro requerida na desinfecção.

Em fevereiro de 2014 foi realizado um teste durante sete dias sem reposição de pastilhas no clorador, utilizando um tubete com furos a 30 cm de altura e vazão média de 0,45 l/s. A Figura 5.7 mostra a curva da concentração de cloro dosado pelo clorador de pastilhas de ATCI neste teste.

Figura 5.7 Curva da concentração de cloro residual total



Como observado na Figura 5.7, a concentração de cloro variou de 102 mg/l a 130 mg/l, com um valor médio de 120 mg/l. Os resultados variaram 7,8 %, em relação à média.

5.2. Etapa 2 - ensaio experimental para estimativa da dosagem de cloro

Os cinco testes laboratoriais para cumprimento desta etapa foram realizados de janeiro a março de 2013. Os testes foram realizados a uma temperatura média de 26 °C, com pH médio de 7,1 nos testes do ATCl e 7,7 nos do hipoclorito de sódio. Na Tabela 5.2 estão os valores médios de inativação de coliformes totais e *Escherichia coli* e a análise estatística dos resultados com nível de significância de 5 %.

Tabela 5.2 Valores da concentração de NaClO e ATCI utilizados na inativação média de coliformes totais e *E.coli* na pesquisa com efluentes da lagoa facultativa de Itirapuã

Concen- tração (mg/l)	Tempo contato (minutos)	Fator CT mg.min/l	Inativação média – unidade logarítmica				Análise estatística	
			Coliforme total		<i>E. coli</i>		Coliforme total	<i>E.coli</i>
			NaClO	ATCI	NaClO	ATCI		
2,5	5	12,5	1,9	1,9	1,1	1,1	A	A
	15	37,5	1,9	2,2	2,8	2,3	A	A
	30	75	2,5	3,6	3,6	4,4	B	B
	45	112,5	2,9	4,2	4,2	4,5	B	A
	60	150	3,5	4,5	4,5	4,5	B	A
3,5	5	17,5	1,8	1,8	1,6	1,2	A	A
	15	52,5	2,3	4,3	3,5	4,1	B	A
	30	105	3,1	5,0	4,1	4,5	B	B
	45	157,5	4,7	4,3	4,5	4,5	A	A
	60	210	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
5	5	25	2,2	2,6	2,5	2,2	A	A
	15	75	3,1	5,0	4,5	4,4	B	A
	30	150	4,1	5,1	4,5	4,5	A	A
	45	225	4,8	5,3	4,5	4,5	A	A
	60	300	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
10	5	50	2,5	2,6	2,1	2,1	A	A
	15	150	4,6	5,3	4,5	4,5	A	A
	30	300	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	45	450	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	60	600	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
15	5	75	3,2	2,6	3,0	2,6	A	A
	15	225	5,1	5,3	4,5	4,5	A	A
	30	450	5,2	5,3	4,5	4,5	A	A
	45	675	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	60	900	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
20	5	100	3,2	2,8	2,9	2,4	A	A
	15	300	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	30	600	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	45	900	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A
	60	1200	5,3	5,3	4,5	4,5	A	A

A – não há diferença estatisticamente significativa

B – há diferença estatisticamente significativa

Considerando trinta minutos, que é o tempo estimado para o tanque de contato da ETE, pode ser observado na Tabela 5.2 que a menor concentração de cloro aplicada com NaClO que simultaneamente resultou em inativação de coliformes totais e *E.coli* superior a 4 unidades logarítmicas foi 5 mg/l, e que corresponde a um fator CT de 150 mg.min/l. Para o ATCI foi a concentração de 3,5 mg/l, correspondente a um fator CT de 105 mg.min/l.

Realizando a comparação dos desinfetantes pelo fator CT, ficou demonstrado que o ATCl foi mais eficiente que o NaClO, pois atingiu a mesma eficiência com um fator CT de 105 mg.min/l enquanto o NaClO necessitou de 150 mg.min/l, considerando-se trinta minutos de tempo de contato. Porém, no tratamento estatístico dos resultados pelo teste de Kruskal-Wallis, foi verificado que nas concentrações de 5 mg.L-1, 2,5 mg/l e 3,5 mg/l, para alguns tempos de contato, é que houve diferença estatisticamente significativa, confirmando o melhor desempenho do ATCl. Nas demais concentrações não ocorreu diferença estatisticamente significativa entre os resultados do ATCl e do NaClO.

Pode ser observado na Tabela 5.8, referente à caracterização do efluente, que o teor de amônia presente é elevado. Por esta condição, nos testes realizados, a ação desinfetante do NaClO e ATCl foi exercida pelo cloro residual combinado, predominantemente pelas monoclaminas, porque são formadas em pH superior a 7,0. Assim, o fator CT de 150 mg.min/l e 105 mg.min/l encontrado, condiz com o descrito por Gonçalves (2003), que prevê a faixa de 95 mg.min/l a 180 mg.min/l, para cloro combinado na inativação de *E.coli*. Também se aproxima da concentração estabelecida por Coraucci *et al.* (2003), para desinfecção de efluente de lagoa de estabilização, ou seja, de 6 mg/l a 13 mg/l de cloro e concorda com White (2010) que recomenda fator CT de pelo menos 120 mg.min/l para desinfecção de efluente contendo mais que 10.000 coliformes termotolerantes.

5.3. Etapa 3 - Implantação do sistema de desinfecção na ETE

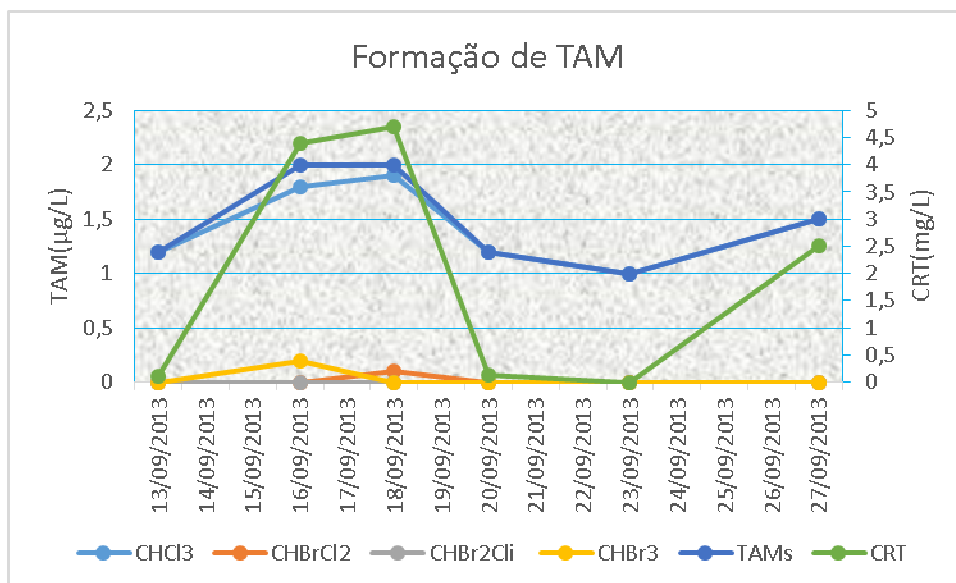
5.3.1 Avaliação da formação de TAMs

Os primeiros resultados do teste de desinfecção estão apresentados na Tabela 5.3 e Figura 5.8, os quais foram obtidos a partir do clorador operando com tubete perfurado a 30cm de altura e vazão média de 0,43 l/s.

Tabela 5.3 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 1

Data	Efluente clorado				Rio jusante		
	CHCl ₃	CHBrCl ₂	CHBr ₂ Cl	CHBr ₃	TAMs	CRT	CRT
	µg./l					mg/l	mg/l
13/9/13	1,2	0,000	0,000	0,000	1,200	0,1	< 0,15
16/9/13	1,8	0,000	0,000	0,200	1,800	4,4	< 0,15
18/9/13	1,9	0,100	0,000	0,000	1,900	4,7	< 0,15
20/9/13	1,2	0,000	0,000	0,000	1,200	0,14	< 0,15
23/9/13	1,0	0,000	0,000	0,000	1,000	0	< 0,15
27/9/13	1,5	0,000	0,000	0,000	1,500	2,5	< 0,15
Média	1,4333	0,0167	0,000	0,0333	1,4833	1,9733	-

Figura 5.8 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 1



A quantidade de TAMs formados no teste de desinfecção dos efluentes da lagoa facultativa foi bastante pequena, em relação, por exemplo, ao padrão de potabilidade (100 µg/l) estabelecido pela portaria 2914/2011. Foram formados 1,48 µg/l de TAMs totais, dos quais 1.43 µg/l de clorofórmio e o restante dividido entre bromofórmio e diclorobromometano. Nesta etapa não foi atingida a meta estabelecida de remoção de coliformes (pelo menos 4 unidades logarítmicas). E como não foram observadas ocorrências operacionais que justificassem este comportamento dos

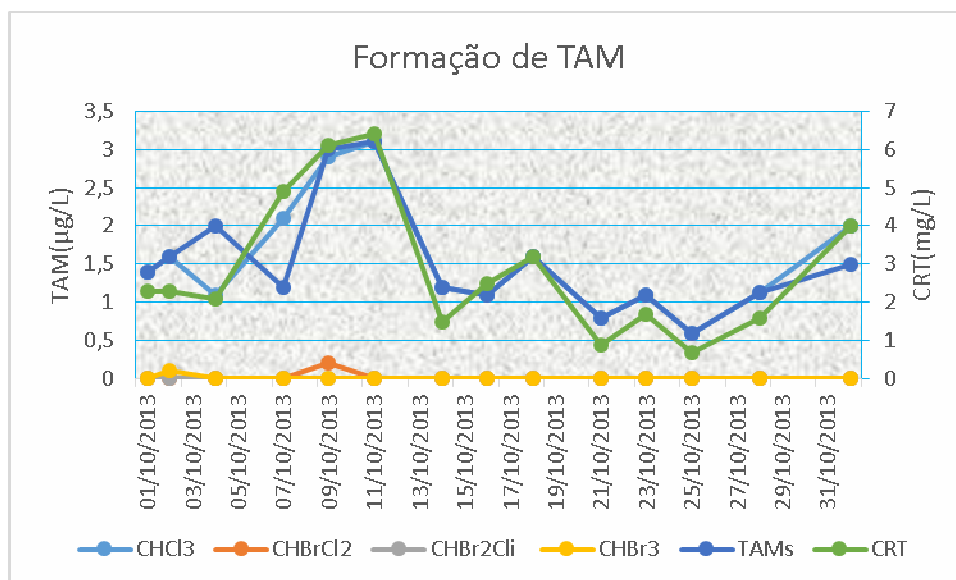
resultados, optou-se por aumentar a vazão do clorador visando atingir resultados melhores.

A Tabela 5.4 e a Figura 5.9 trazem os resultados da formação de TAMs de um novo período de acompanhamento, agora operando com vazão média de 0,71 l/s.

Tabela 5.4 Formação de TAMs – teste 2

Data	Efluente clorado				TAMs	Rio jusante	
	CHCl3	CHBrCl2	CHBr2Cl μg./l	CHBr3		CRT mg/l	CRT mg/l
01/10/2013	1,4	0	0	0	1,4	2,3	< 0,15
02/10/2013	1,6	0	0	0,1	1,7	2,3	< 0,15
04/10/2013	1,1	0	0	0	2	2,1	< 0,15
07/10/2013	2,1	0	0	0	1,2	4,9	< 0,15
09/10/2013	2,9	0,2	0	0	3,1	6,1	< 0,15
11/10/2013	3,1	0	0	0	3,1	6,4	< 0,15
14/10/2013	1,2	0	0	0	1,2	1,5	< 0,15
16/10/2013	1,1	0	0	0	1,1	2,5	< 0,15
18/10/2013	1,6	0	0	0	1,6	3,2	< 0,15
21/10/2013	0,8	0	0	0	0,8	0,9	< 0,15
23/10/2013	1,1	0	0	0	1,1	1,7	< 0,15
25/10/2013	0,6	0	0	0	0,6	0,7	< 0,15
28/10/2013	1,12	0	0	0	1,12	1,6	< 0,15
01/11/2013	2	0	0	0	1,5	4	< 0,15
Média	1,5514	0,0143	0	0,0071	1,5371	-	-

Figura 5.9 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 2



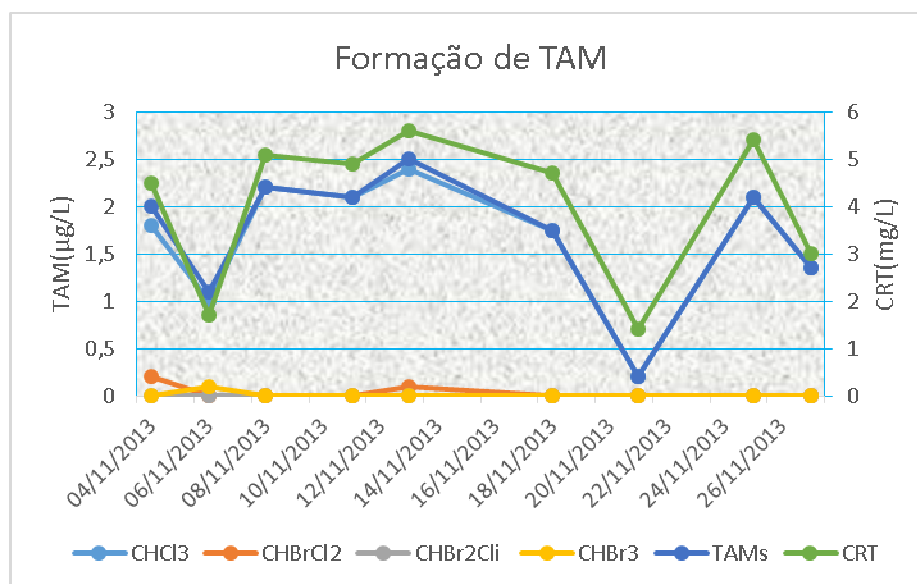
Perante os resultados obtidos no teste de desinfecção, suspeitou-se que o tanque de contato poderia não estar operando conforme esperado. Assim, enquanto a cloração era acompanhada, alguns testes foram realizados no tanque de contato através da dosagem de fluoreto de sódio, utilizado como traçador para avaliar o comportamento hidráulico do tanque. Os resultados evidenciaram que o tanque apresenta caminhos preferenciais e zonas mortas, sendo necessários pelo menos 110 minutos para que a concentração total de flúor dosada no início do tanque chegasse ao seu final, sendo desconsiderado os trinta minutos de tempo de retenção médio, proposto no projeto para o tanque de contato.

Com isto, os testes para verificação da formação de TAMs prosseguiram no início de novembro na mesma condição anterior, porém com as coletas do efluente desinfetado sendo realizadas após duas horas do início da dosagem do cloro. Neste período de avaliação, a vazão média do clorador ficou em 0,67 l/s. Os resultados desta nova etapa estão apresentados na Tabela 5.5 e na Figura 5.10.

Tabela 5.5 Formação de TAMs – teste 3

Data	Efluente clorado					Rio jusante	
	CHCl ₃	CHBrCl ₂	CHBr ₂ Cl μg./l	CHBr ₃	TAMs	CRT mg/l	CRT mg/l
04/11/2013	1,8	0,2	0	0	2	4,5	< 0,15
06/11/2013	1	0	0	0,1	1,1	1,7	< 0,15
08/11/2013	2,2	0	0	0	2,2	5,1	< 0,15
11/11/2013	2,1	0	0	0	2,1	4,9	< 0,15
13/11/2013	2,4	0,1	0	0	2,5	5,6	< 0,15
18/11/2013	1,75	0	0	0	1,75	4,7	< 0,15
21/11/2013	0,2	0	0	0	0,2	1,4	< 0,15
25/11/2013	2,1	0	0	0	2,1	5,4	< 0,15
27/11/2013	1,35	0	0	0	1,35	3	< 0,15
Média	1,6556	0,0333	0	0,0111	1,7000	-	-

Figura 5.10 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 3

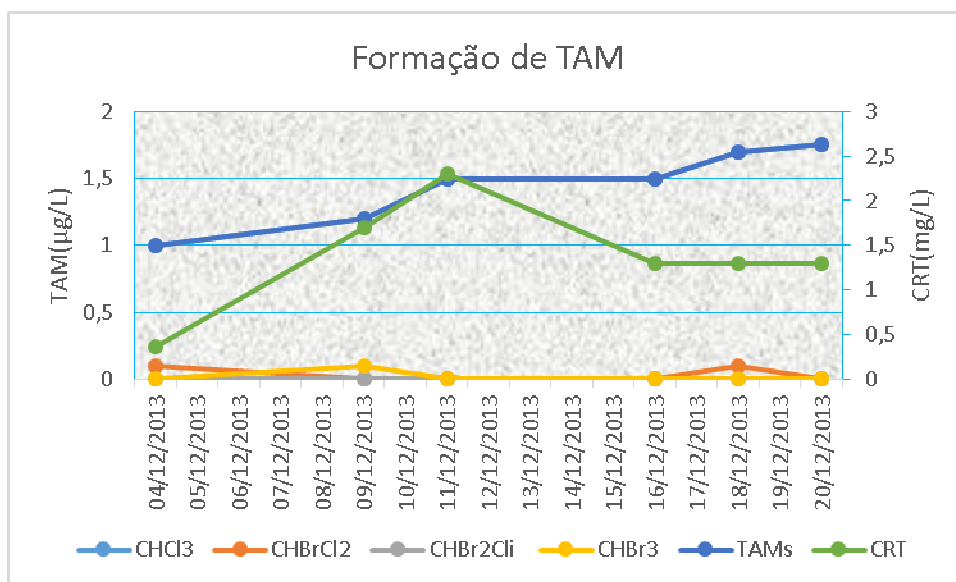


Durante esta etapa ocorreu um aumento das chuvas, o que dificultou a condução dos testes pelas alterações provocadas na vazão da ETE. Com o objetivo de testar o sistema, restringiu-se a vazão do clorador e novos resultados foram levantados com uma vazão média de 0,31 l/s. Na Tabela 5.6 e Figura 5.11 estão os resultados.

Tabela 5.6 Formação de TAMs – teste 4

Data	Efluente clorado				TAMs	Rio jusante	
	CHCl ₃	CHBrCl ₂	CHBr ₂ Cl	CHBr ₃		CRT mg./l	CRT mg./l
04/12/2013	1	0,1	0	0	1	0,36	< 0,15
09/12/2013	1,2	0	0	0,1	1,2	1,7	< 0,15
11/12/2013	1,5	0	0	0	1,5	2,3	< 0,15
16/12/2013	1,5	0	0	0	1,5	1,3	< 0,15
18/12/2013	1,7	0,1	0	0	1,7	1,3	< 0,15
20/12/2013	1,75	0	0	0	1,75	1,3	< 0,15
Média	1,4417	0,0333	0	0,0167	1,4417	-	-

Figura 5.11 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 4

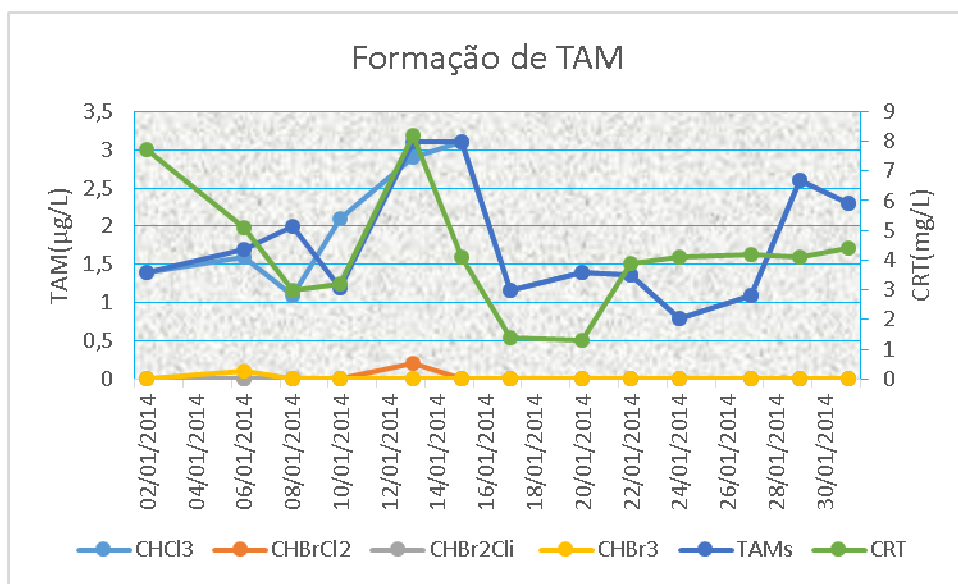


Para prosseguir com a avaliação, abriu-se a válvula de entrada do clorador para uma vazão intermediária aos dois últimos períodos testados, ficando o valor médio em 0,43 l/s, o que representa a condição inicial dos testes. Os resultados desta fase estão apresentados na Tabela 5.7 e Figura 5.12.

Tabela 5.7 Formação de TAMs – teste 5

Data	Efluente clorado				TAMs	Rio jusante	
	CHCl3	CHBrCl2	CHBr2Cl	CHBr3		CRT	CRT
			$\mu\text{g./l}$			mg./l	mg./l
02/01/2014	1,4	0	0	0	1,4	7,7	< 0,15
06/01/2014	1,6	0	0	0,1	1,7	5,1	< 0,15
08/01/2014	1,1	0	0	0	2	3	< 0,15
10/01/2014	2,1	0	0	0	1,2	3,2	< 0,15
13/01/2014	2,9	0,2	0	0	3,1	8,2	< 0,15
15/01/2014	3,1	0	0	0	3,1	4,1	< 0,15
17/01/2014	1,17	0	0	0	1,17	1,4	< 0,15
20/01/2014	1,39	0	0	0	1,39	1,3	< 0,15
22/01/2014	1,36	0	0	0	1,36	3,9	< 0,15
24/01/2014	0,8	0	0	0	0,8	4,1	< 0,15
27/01/2014	1,1	0	0	0	1,1	4,2	< 0,15
29/01/2014	2,6	0	0	0	2,6	4,1	< 0,15
31/01/2014	2,3	0	0	0	2,3	4,4	< 0,15
Média	1,7631	0,0154	0	0,0077	1,7862	-	-

Figura 5.12 Formação de TAMs no teste de desinfecção do efluente da lagoa facultativa – teste 5



Nesta condição, confirmou-se que a condição proposta inicialmente de operar o sistema com vazão de 0,44 l/s e 100 mg/l de cloro residual total, sendo suficiente para a desinfecção do efluente da ETE. Tal condição resulta numa concentração de cloro residual total aplicada no efluente de 10 mg/l.

Observou-se uma pequena quantidade de TAM formada em todas as etapas da avaliação da formação de TAM, em torno de 1,5µg/l.

O efluente utilizado apresentou concentração média nitrogênio amoniacal de 43,0 mg/l e de pH 7,6.

Quanto ao tempo de contato de trinta minutos, proposto em função dos dados de projeto do tanque de contato, não pôde ser considerado nesta avaliação. A vazão média da ETE de 4.42 l/s, considerada para dimensionamento do clorador, foi medida na Calha Parshall e difere dos dados informados inicialmente. Com esta vazão, o tempo de detenção calculado pelo volume do tanque de contato é de aproximadamente 108 minutos. Mesmo conhecendo este tempo de detenção, os resultados não são discutidos baseados nele porque o tanque de contato apresenta problemas hidráulicos no escoamento do esgoto, conforme já citado, que dificultam a interpretação dos dados. Portanto, as considerações sobre os resultados serão feitas para a concentração de cloro residual total aplicada e não pelo fator CT.

A PUCPR trabalhou com cloração de efluente sanitário, com dosagem de até 7,5 mg/l e tempo de contato próximo de 30 minutos, entre os anos de 2002 e 2003; onde o maior residual de TAM encontrado foi de 16,8 µg/l (GONÇALVES, 2003).

Pianowski e Janissek (2003) avaliaram a formação de TAMs em efluente de Ralf seguido de filtro biológico anaeróbio, com concentração de nitrogênio amoniacal de 60mg/l e pH em torno de 7,3, e obtiveram as concentrações de 16,8, 48,8 e 97,1µg/l de clorofórmio para dosagens aplicadas de 4, 8 e 12mg/l respectivamente.

Shuck (2004) concluiu em sua pesquisa com efluente de estações de tratamento biológico, que na mais alta concentração de cloro aplicada (20 mg/l) e com tempo de contato de 168 horas, o valor de TAM não excedeu a 1 mg/L, inferior ao recomendado pela legislação em teor de clorofórmio.

Léo (2008) obteve a concentração média de TAM de 16 µg/L em efluente desinfetado com 8mg/L de cloro livre e não desclorado. Encontrou, também, as concentrações de 15 e 13 µg/L quando aplicou a concentração de 12mg/L de cloro, sem e com descloração respectivamente.

Silva (2008) trabalhou na cloração de efluente sanitário de um sistema de tratamento anaeróbio com aplicação de 10mg Cl/L e tempo de contato de 30 minutos, concluindo que houve pouca ou nenhuma formação de TAM.

Em um teste com clorador de pastilhas de hipoclorito de cálcio, Tchobanoglous (2006) obteve um valor médio de 20 mg.L⁻¹ de cloro residual total para desinfecção de um efluente sanitário de tratamento secundário.

Em outro exemplo, Sundefeld Júnior (2012) aplicou hipoclorito de sódio na desinfecção de efluente sanitário de lagoa facultativa, com características similares ao desta pesquisa, e obteve formação de TAM de 1,0 µg/L para dosagens de 7,5, 10 12,5 mg/L.

A reduzida formação de TAMs, sempre menor que 3,0 µg/L obtida neste estudo concorda com os resultados de Silva (2008) e Sundefeld Júnior (2012), pois resultam de pesquisas realizadas em condições semelhantes e também concorda com o observado por Macedo (2003) que a probabilidade de formação de trihalometanos é muito pequena ou nula no caso de cloração utilizando ATCl. Quanto ao proposto por Shuck (2004) também é compatível. Já os resultados de Pianowski e Janissek (2003) e Léo (2008) servem de comparação, embora não tão próximos quanto os anteriores, pois se originaram da desinfecção de efluentes com características um pouco diferentes

deste aqui empregado. Mas de forma geral, pode-se afirmar que os resultados são comparáveis.

O valor de 10 mg/L de cloro residual total obtido neste trabalho concorda com os resultados de Piveli (2004) e Sundefeld Júnior (2012), pois resultam de pesquisas realizadas em condições semelhantes. Quanto ao proposto por Lazarova ET AL. (1999) também é compatível. Já os resultados de Tonon (2007) e Tchobanoglous (2006) servem de comparação, embora não tão próximos quanto os anteriores, pois se originaram da desinfecção de efluentes com características um pouco diferentes deste aqui empregado. Mas de forma geral, pode-se afirmar que os resultados são comparáveis.

Conforme mencionado em capítulos anteriores, como um produto clorado o ATCI tem sua ação desinfetante baseada nos mesmos mecanismos de outros produtos clorados e a similaridade dos resultados descrita anteriormente confirma esta informação. Portanto, o diferencial da desinfecção com o ATCI é a facilidade operacional, a aplicação sem uso de energia elétrica e a possibilidade de não formar subprodutos, conforme previsto por Macedo (2003).

Outro fato observado nos testes foi que o clorador operando com vazão de 0,43 L/s apresentou melhor desempenho que operando com 0,67 L/s, confirmando que o fluxo mais lento no interior do clorador facilita a dissolução das pastilhas.

Quanto à operação do sistema, foi observado com certa frequência durante os testes um problema de interrupção na dosagem de cloro, fato que ocorre quando as pastilhas da área molhada desgastam e as que estão acima não descem ficando travadas na parede do clorador, criando um vazio. Este problema foi superado batendo-se na parede do clorador para liberar as pastilhas, mas acredita-se que trabalhando com pastilhas de tamanho menor isto seria evitado.

Outra limitação observada foi o aumento repentino da vazão em alguns momentos, sem que o efluente passasse pela ETE, sendo encaminhado direto para a Calha Parshall. Este fato atrapalha a desinfecção e pode justificar algumas anomalias ocorridas durante os testes.

Em todas as coletas realizadas para avaliação da eficiência de desinfecção também foi analisado o teor de cloro residual total no Ribeirão Capanema, no ponto após o lançamento do efluente desinfectado, conforme demonstrado nas Tabelas 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, na coluna “Rio jusante”. Com isto verificou-se que os resultados permaneceram sempre abaixo do limite de detecção do método (0,15 mg/l).

5.3.2 Caracterização do efluente

Na tabela 5.8 estão os resultados de caracterização do efluente da ETE submetido à desinfecção no período de setembro de 2013 a janeiro de 2014.

Tabela 5.8 Resultados de caracterização do efluente

Parâmetro	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
Amônia	mg./l	43,0	54,3	32,4	9,0
Coli total	NMP/100ml	3,740E+06	7,701E+06	9,050E+05	2,906E+06
Condutividade	µS/cm	1003	1073	952	60,2
Cor aparente	UC	309	348	282	29,6
DBO	mg/l	69	80	50	14,4
DQO	mg/l	282	321	214	50,2
E.coli	NMP/100ml	4,873E+05	7,270E+05	1,610E+05	2,727E+05
Fósforo	mg/l	9,9	10,8	8,9	1,0
Nitrato	mg/l	2,0	2,3	1,8	0,3
OD	mg/l	3,6	7,2	0,4	3,3
pH	-	7,6	7,8	7,3	0,2
SST	mg/l	102	132	32	47,2
ST	mg/l	624	690	594	44,6
Turbidez	NTU	135	196	64	60,5

5.3.3 Avaliação do custo da desinfecção utilizando ATCI

O custo da desinfecção do efluente da lagoa facultativa de Itirapuã com a utilização de ATCI teve sua estimativa baseada através das informações contidas na Tabela 5.9. Foi considerado o período de 10 anos de durabilidade do clorador e a vazão de 4,42 l/s. Os valores utilizados no cálculo referem-se ao mês de abril de 2014.

Tabela 5.9 Custo da desinfecção com ácido tricloroisocianúrico

Item	Unidade	Valor (R\$)	Consumo/ mês	Custo mês (R\$)	-
Clorador	-	300,00	0,0083	2,50	-
Instalação	-	150,00	0,0083	1,25	-
Pastilhas de ATCI	Kg	14,45	171	2.470,95	-
Operação e manutenção	Hora	10,42	6	62,52	-
Total	-	-	-	2.535,22	-
Volume de esgoto tratado	m ³	-	-	-	11.456,54
Custo da desinfecção	R\$/ m ³	-	-	-	0,22

O custo total da desinfecção de R\$ 0,22/m³ de esgoto tratado foi considerando a vazão medida através de Calha Parshall, disposta no final da ETE da lagoa facultativa de Itirapuã. Este custo seria reduzido para R\$0,14/m³, no caso do cálculo ser realizado considerando o consumo diário de água de 150L/hab.dia e uma população urbana de 5.000 habitantes.

O custo total, de instalação mais operação, da hipocloração e da decoloração em tanque de contato de cloro, para populações de 500 a 2.000 pessoas, ficou em torno de R\$ 0,042/m³, para hipocloração, e R\$ 0,045/m³, para decoloração, em pesquisas realizadas pela rede PROSAB (GONÇALVES, 2003).

6 CONCLUSÃO

1 – A reduzida formação de TAMs, sempre menor que 3,0 µg/L, que ocorreu no efluente tratado da lagoa facultativa de Itirapuã, pode ser atribuída à presença de elevadas concentrações de amônia.

2 – O fato do tanque de contato da estação de tratamento de esgoto não operar conforme projeto, impediu o cálculo de um fator CT na etapa de desinfecção do efluente em escala real, prejudicando a comparação com os dados obtidos experimentalmente na segunda fase do trabalho.

3 – O custo da desinfecção utilizando o ATCI é superior ao do NaClO e da radiação ultravioleta.

4 – A desinfecção com clorador de pastilhas utilizando o ATCI é viável do ponto de vista operacional, tendo como vantagens a praticidade, a eficiência, a flexibilidade e a dispensa de energia elétrica. Entretanto é fundamental o acompanhamento do sistema para evitar falhas de dosagem.

5 – A passagem do líquido pelo clorador com pastilhas de ATCI foi mais eficiente para promover a dissolução cloro nas vazões menores.

6 – Nas concentrações superiores a 5 mg/l de cloro residual total não ocorreram diferenças estatisticamente significativas, entre os resultados da desinfecção com ATCI e NaClO.

7 - Verificou-se através das análises que a característica do efluente testado na terceira etapa sofreu variações que provavelmente levaram a uma maior demanda de cloro para sua desinfecção.

7 RECOMENDAÇÕES OU SUGESTÕES

1 – Avaliar o desempenho de um sistema de cloração com pastilhas de ATCl na desinfecção de efluente sanitário de outras lagoas facultativas.

2 – Avaliar a formação de ácidos haloacéticos na desinfecção de efluente sanitário com ATCl.

3 – Conduzir testes de desinfecção dos mesmos efluentes eliminando as concentrações de N-NH_3 , de modo a verificar de maneira mais ampla sua influência na formação de TAMs.

4- Avaliar a influência da concentração de DQO e DBO na formação de TAMs.

5 – Desenvolver testes de caracterização de precursores dos TAMs presentes nos efluentes estudados, de modo a estudar sua influência na formação de SPDs.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHER, A., FISCHER, E., TURNHEIN, R., MANOR, Y. **Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques** – Water Research Elsevier Science, n 6, v. 31, p.1398-1404, 1997

AWWA/APHA/WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. New York: American Public Health Association, 2012.

BELLAR, T. A. et al. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking waters. **Journal AWWA**, EUA, v.66, n.12, p.703-706, 1974.

BERACA. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos**. 7 p. 2011. Disponível em: <<http://www.beraca.com>>>. Acesso em: 12 nov. 2012.

BORGES, J. T; GUIMARÃES, J.R. **A formação e os riscos associados à presença de Trialometanos em águas de abastecimento**: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 6, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2002, Anais em CD-ROM. 5 p.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. Resolução número 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre classificação dos corpos d'água, e diretrizes ambientais para seu enquadramento bem como estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**, Brasília, 2005.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. Resolução número 430, de 13 de Maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**, Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal. **Conselho Nacional de Recursos Hídricos**, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece critérios gerais para reuso de água potável. **Conselho Nacional de Recursos Hídricos**, Brasília, 2006.

CAMARGO, J.G. **Aplicação do dióxido de cloro na desinfecção de efluentes domésticos tratados pelo sistema de lodos ativados**. 2004. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAMPOS, J.A. **Desinfecção de Efluente de Lagoa de Estabilização com Ácido tricloroisocianúrico (ATCI) em Pastilhas: Avaliação da Remoção de Coliformes**. 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CARBOCLORO. **Hipoclorito de sódio**: especificação do produto. 2012. Disponível em: <<http://www.carbocloro.com.br>> Acesso em: 12 nov. 2013.

CAVALLINI, G. S ET AL. Utilização do ácido peracético na desinfecção de esgoto sanitário: uma revisão. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 33. n. 1, p. 27-40, jan./jun. 2012.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Desinfecção de águas**. Coordenador: José Martiniano de Azevedo Neto. São Paulo: CETESB, 1974. v. III, 210 p.

CHERNICHARO, C.A.L.; DANIEL, L. A.; SENS. , M.; COURAUCCI FILHO, B.; **Projeto PROSAB – Edital II tema 2 – Pós-Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Coordenador: Carlos Augusto Lemos Chernicharo, 2001, 544p.

CHLORINE INSTITUTE. **Benefits and risks of wastewater chlorination**. Philadelphia, 1997. (Pamphlet 157).

CORAUCCI FILHO, B. ET AL. Cloração e descloração. In: GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários**, Prosab - Edital 3. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Capítulo 4. p.113-168.

CORAUCCI FILHO, B. ET AL. Disposição no solo. In: GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários**, Prosab - Edital 3. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Capítulo 8. p.337-387.

CUNHA, A.C. ET AL. Cloreto isocianúrico e cloreto cianúrico: aspectos gerais e aplicações em síntese orgânica. **Revista Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 29, n.3, p. 520-527, 2006.

DANIEL, L.A. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**, Prosab Edital 2 – São Carlos, 2001, 139p.

DE LUCA, S.J.; MONTEGGIA, L. O. Outros processos de desinfecção. In: GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários**, Prosab - Edital 3. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Capítulo 9. p.389-408.

DI BERNARDO, L. **MÉTODOS E TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA, VOLUME II - RIO DE JANEIRO**: ABES, 1993.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**, 2 ed, v.1 e 2. São Carlos: Rima, São Paulo, 2005.

EL-REHAILI, A.M. **Response of BOD, COD and TOC of Secondary Effluents to Chlorination** – Water Research Elsevier Science, n 6, v. 29, p.1571-1577, 1995

FAIR, G. M; GEYER, J. C. e OKUM, D. A. **Water and Wastewater Engineering**. 1954. New York: John Wiley & Sons.

GALLARD, H.; VON GUNTEN, U. Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and THM formation. **Water Research**, Suíça, v.36, p.65-74, 2002.

GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários**, Prosab - Edital 3. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 438p.

HOUSTON, A.C. **Studies in Water Supply**. Macmillan e Co., Ltd. London, 1913.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Situação do saneamento no Brasil**. 2010. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br>>. Acesso em: 04 fev. 2013.

JORDÃO, E. P. & PESSOA, ARRUDA, C.: **Tratamento de esgotos domésticos** 6ª edição, Rio de Janeiro, 2011, 969p.

KRASNER, S. W. et al. The occurrence of disinfection by-products in US drinking Water. **Journal of the American Water Works Association**, v. 78, n. 3, p. 62, 1989.

LAUBUSCH, E. J. Chlorination and other disinfection processes. In: **Water Quality and Treatment: A Handbook of Public Water Supplies** (American Water Works Association). New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1971. p. 158-224.

LAPOLLI, F.R. ET AL. Desinfecção de efluentes sanitários através de dióxido de cloro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.10, n.3, p.200-208, jul-set. 2005.

LAZAROVA, V ET AL. Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Research**, Grã Bretanha, n 4-5, v. 40, p.203-213, 1999.

LEAL, J.L. **Sterilization plant of the Jersey City Water Supply**. J.AWWA 100, 1909.

LEAVERENZ, H.; DARBY, J.; TCHOBANOLOUS, G. **Evaluation of disinfection units for onsite wastewater treatment systems**. Davis: University of California, 2006.

LÉO, L.F.R. **Investigação da toxicidade, tratabilidade e formação de subprodutos tóxicos em efluentes clorados de lagoas de estabilização com e sem pós-tratamento**. 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MACÊDO, J. A. B. **Subprodutos do processo de desinfecção de água pelos derivados clorados - Disinfection byproducts - DBP**, Juiz de Fora, Minas Gerais: Macêdo, 2001.

MACÊDO, J. A. B. Barra, M. M. **Processos de desinfecção em derivados clorados orgânicos em águas para abastecimento público** – Encontro Mineiro de Ensino de Química, Universidade federal de Viçosa, 2003.

MATTOS, A. A. **Tratamento de água para abastecimento público com o uso de tablets de ácido tricloroisocianúrico** – Assembleia Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento, 34. São Paulo: ASSEMAE – Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento, 19 de abril de 2004.

MEYER, S. T. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de Trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, n.10 (1), p. 99-110, jan./mar. 1994.

MEZZANOTTE, V; ANTONELLI, M; CITTERIO, S; NURIZZO, C. Wastewater disinfection alternatives: chlorine, ozone, peracetic acid, and UV light. **Water Environment Research**, Itália, v. 79, n. 12, p.2373-2379, nov. 2007.

OPAS - Organización Panamericana de la Salud. **Guias para la calidad del agua potable**. Washington (DC); 1987, v.2.

PEREIRA, D. C. F. **Deteção de subprodutos da desinfecção com cloro em água dessalinizada**. 2007. 118 p. Dissertação (Mestrado em Química) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.

PIANOWSKI, E. H.; JANISSEK, P. R. Desinfecção de efluentes sanitários com uso de cloro: avaliação da formação de trihalometanos. **Sanare**, Curitiba, v.20, n. 20, p.6-17, 2003.

PIVELI, R. P. ET AL. Cinética e hidráulica dos processos de desinfecção. In: GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários**, Prosab - Edital 3. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Capítulo 3. p.89-112.

PIVELI, R. P. KATO, M.T. **Qualidade das águas e poluição**: Aspectos Físico-químicos. 01ed. São Paulo: ABES V.01, 285p, 2005.

POHLMANN, M. **Tratamento de esgotos sanitários visando reúso**. 2010. 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITIRAPUÃ. **Plano de saneamento municipal**: água e esgoto. Itirapuã, 2011.

RECOMMENDED STANDARDS FOR WASTEWATER FACILITIES. New York: Health Research Inc.; Health Education Services Division, 2004. Disponível em: <<http://www.hes.org>>. Acesso em: 18 mar. 2013.

SABESP. **Monitoramento de efluentes**: município de Itirapuã. Franca: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2013.

SCHUCK, C.A. **Ocorrência de Trialometanos e ácidos holoacéticos na desinfecção de efluentes tratados biologicamente**. 2004. 81 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA, G.H.R. **Formação de aldeídos e Trialometanos na desinfecção por ozonização, cloração e ozonização de efluente de tratamento anaeróbico de esgoto sanitário**. 2008. 401 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SOARES, J. B.; MAIA, A. C. F.; **Água: Microbiologia e Tratamento**, 1ª ed.; Fortaleza; EUFC; 1999; 206p.

SOUZA, J. B.; DANIEL, L. A. Comparação entre hipoclorito de sódio e ácido peracético na inativação de *E. coli*, colifagos e *C. perfringens* em água com elevada concentração de matéria orgânica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2 , abr./jun. 2005.

SUNDEFELD, G.C. **Pós-Tratamento de efluentes de reatores UASB visando o uso agrícola**. 2012. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SYMONS, J. M. et al. **Treatment techniques for controlling trihalomethanes in drinking water**. Cincinnati: USEPA, 1981. 289p.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. 4 Ed. Boston, McGraw-Hill, Inc. 2003. 1819 p.

TOMINAGA, M. Y.; MIDIO, A. F. Exposição humana a trialometanos presentes em água tratada. **Revista Saúde Pública**, São Paulo, v.33, n.4, p.421-434, 1999.

TONON, D. **Desinfecção de efluentes sanitários por cloração visando o uso na agricultura**. 2007. 248 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Alternative Disinfectants and oxidants guidance manual, EPA 815-R-99-014**. 1999, 346 p.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Municipal Wastewater Disinfection – Desing Manual, EPA/625/1-86/021**, Cincinnati, 1986, 247p.

VESCHETTI, E. ET.AL. Pilot-plant comparative study of peracetic acid and sodium hypochlorite wastewater disinfection. **Water Research**, Grã Bretanha, n. 37, p.78-94, 2003.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996. v. 1, 243 p.

WHITE, J. C. **“Handbook of chlorination and Alternative Disinfectants”**. 4^a ed. Nova Iorque:John Wiley & Sons, INC.. 1999. 1569p.

WHITE, J. C. **Handbook of chlorination and Alternative Disinfectants**. 5^a ed. New Jersey:John Wiley & Sons, INC.. 2010. 1009p.